

NSK TECHNICAL JOURNAL

JANUARY・2023

No. 695

自動車用製品・技術三二特集号



NSK TECHNICAL JOURNAL

JANUARY・2023

No. 695

巻頭言

自動車用製品・技術ミニ特集号によせて 近江 勇人 1

解説・論文

HEV・EV ユニット用耐電食絶縁皮膜軸受の開発 甲藤 智 2

カーボンニュートラルに貢献するハブユニット軸受 加藤 明治 8

磁歪式トルクセンサシステムの開発 大寺 貴裕, 福田 晃大, 小野 潤司 17

生理特性を用いたオフセンタ領域における操舵感の評価
..... 三宅 正樹, 神邊 篤史, 鈴木 桂輔, 西尾 誠人 24**商品紹介**

トランスミッション用ラビリンスシール付き玉軸受 38

耐クリーブ摩耗 BOC 軸受 40

HEV・EV 用高速回転玉軸受 Gen4 の開発 42

トラック用大型 T-HUB1 軸受 44

次世代長寿命プラネタリシャフト (SHJ7) 46

電動車両用大径シェルニードル軸受 48

舵角センサレス検出機能を搭載したコラムタイプ EPS 50

解説・論文

製鉄設備用軸受の技術動向 野村 剛 52

歯科エアタービン QuickStopBearing™ 岡崎 峰人, 白井 幹子 64

電気インピーダンス法によるボールねじ・リニアガイドの潤滑状態評価
..... 青山 樹林, 筒井 燦 70

NSK VIRTUAL EXPO 矢野 吉章 79

永久磁石同期電動機の振動簡易予測手法と応用 新田 勇 84

遺伝子改変マウス作製のための自動胚操作システムの確立
..... 植田 裕基, 江藤 智生, 田中 伸明 95**商品紹介**

NSK Verify (2次元コードを用いた軸受情報取得サービス) 110

バイオマスプラスチック保持器搭載 深溝玉軸受 112

高負荷容量プレス保持器アンギュラ玉軸受 (BEAW) 114

NSK TECHNICAL JOURNAL

JANUARY•2023

No. 695

Preface

NSK's Automotive Products and Technologies H. Ohmi 1

Technical Papers

Development of Bearings with Insulating Coating to Resist Electrical Corrosion in HEV/EV Units S. Katto 2

How Hub Unit Bearings Contribute to Carbon Neutrality M. Kato 8

Development of Magnetostrictive Torque Sensor T. Odera, K. Fukuda, J. Ono 17

Evaluation of Steering Feel in the Off-Center Range Using Physiological Characteristics
 M. Miyake, A. Kanbe, K. Suzuki, M. Nishio 24

New Products

Ball Bearings with Labyrinth Seal for Transmission Applications 38

BOC Bearings with Resistance to Wear from Creep 40

Development of Gen 4 High-Speed Ball Bearings for HEVs /EVs 42

Large-Size T-HUB1 Bearings for Trucks 44

Next-Generation Long-Life Planetary Shafts (SHJ7) 46

Drawn Cup Needle Roller Bearings with Large Diameter for Electric/Hybrid Vehicles 48

Column EPS with Steering Wheel Angle Detection 50

Technical Papers

Technical Trends in Bearings for Steelmaking Equipment T. Nomura 52

QuickStopBearing™ for Dental Air Turbines Y. Okazaki, M. Shirai 64

Evaluation of Lubrication Performance in Ball Screws & Linear Guides by
 the Electrical Impedance Method (EIM) J. Aoyama, A. Tsutsui 70

NSK VIRTUAL EXPO Y. Yano 79

Study on Simple Vibration Prediction Method for Permanent Magnet Synchronous Motors and
 Applications I. Nitta 84

Establishment of an Integrated Automated Embryonic Manipulation System for Producing Genetically
 Modified Mice H. Ueda, T. Eto, N. Tanaka 95

New Products

NSK Verify (Bearing Information App with 2D Barcode Scanner) 110

Bioplastic Cage for Deep Groove Ball Bearings 112

High Load Capacity Angular Contact Ball Bearings with Pressed Steel Cage (BEAW) 114

自動車用製品・技術ミニ特集号によせて

自動車事業本部 自動車技術総合開発センター
執行役常務
近江 勇人



NSK Technical Journal をご覧いただき、ありがとうございます。

695号では、自動車用製品・ミニ特集の企画を取り入れております。

100年に1度の変革と言われている自動車の世界では電動システムを用いた駆動装置が盛んに開発され、多種多様な電動車が市場に出てきております。特に高く注目されている電気自動車は、走行中に二酸化炭素を排出しないカーボンニュートラル車として今後ますます普及が進んでいくと予想されています。

モータ駆動の課題のひとつは連続運転可能時間、つまり航続可能距離をいかに長くできるかです。様々な解決策が検討され、開発されていますが、モータの高出力化もその中のひとつの動向であると考えています。また、従来の内燃機関車での燃費と同じように、電動車では電費として、エネルギーロスを限りなくゼロにする動きもますます盛んになっています。

NSKがこれまで取り組んできた基盤技術をさらに高め、電動化によって新たに必要とされる要素機能に応用することによってシステムの効率や性能の向上に貢献するとともに自動車に本来求められる安全・快適にもつなげる技術をご紹介します。

今後も皆様のご指導、ご支援をよろしくお願い申し上げます。

HEV・EVユニット用耐電食絶縁皮膜軸受の開発

甲藤 智*



甲藤 智

Development of Bearings with Insulating Coating to Resist Electrical Corrosion in HEV/EV Units

S. Katto

As environmental issues such as global warming continue to grow in importance, the automotive industry is actively taking efforts to reduce environmental impacts through the release of hybrid electric vehicles (hereinafter HEVs) and electric vehicles (hereinafter EVs). The high-speed, high-efficiency, and high-output bearings that support HEV/HV drive motors can be easily damaged by the flow of high-frequency current through the bearing. Damage from electrical corrosion (electrical erosion) is becoming more frequent, increasing the need for solutions.

Ceramic balls are highly insulating and already widely used; however, their low availability, high price, and replacement requirements have stifled demand in recent years. In response, NSK has been developing low-cost electrically conductive grease and seals, but maintaining high conductivity to further suppress damage has remained an issue.

Here, we introduce the development of a specialized insulating coating that aims to replace high-cost ceramic balls.

1. まえがき
2. 電食とは
3. 電食損傷のクライテリア
4. 焼成膜による絶縁皮膜
 - 4.1 絶縁皮膜箇所
 - 4.2 絶縁皮膜塗料について
 - 4.3 絶縁性と皮膜膜厚について
 - 4.4 耐重荷重性
 - 4.5 クリープ環境下での絶縁持続性
5. あとがき

1. まえがき

地球温暖化などの環境問題を背景として、カーボンニュートラルの実現に向けた社会的取り組みが注目される中、環境負荷が小さいHEV・EVの普及が期待されている¹⁾。電動車の普及に向けた重要課題が『航続距離の延長』と『充電時間の短縮』であり、HEV・EV用駆動モータは高速化・高効率化・高出力化が求められている。モータの動力損失を低減するためには理想的な正弦波形を出力することが必要であり、その

ためインバータ制御周波数(キャリア周波数)は高い周波数が求められる。また、年々自動車の扱うエネルギーは増加傾向にあり、それに伴い電圧/電流は増加、さらに急速充電の観点からも高電圧化の動きが高まっている。この高周波、高電圧/高電流のニーズが重なることによって、HEV・EV用駆動モータを支持する軸受の内部に高周波の電流が流れる。そのことに起因した軸受の電食損傷の発生件数が近年急激に増加してお

* 自動車技術総合開発センター、自動車軸受技術センター、パワートレイン軸受技術部

り、この電食損傷を抑制する耐電食アイテムが求められている。従来の耐電食アイテムとして高い絶縁性を示すセラミックボールが広く普及しているが、近年のセラミックの高い需要による材料不足、材料費高騰化が進んでいるため、セラミックボールに代わる耐電食アイテムの需要が高まっている。これまでにNSKでは耐電食アイテムとして導電グリス・導電シールを開発してきたが、HEV・EV用駆動モータ向け軸受で発生する電食損傷を抑制するほどの導電性を確保することができず、完全な防止対策とはなり得ていない。

本稿では、セラミックボールより低コストとなる耐電食アイテムの一つである絶縁皮膜軸受開発の取組について紹介する。

2. 電食とは

電食は回転中の軸受の軌道面と転動体間に形成される絶縁体の油膜が絶縁破壊を起こし放電されることによって軌道面と転動体が局部的に溶融し凹凸が生じる現象である。顕著なものでは写真1に示す“リッジマーク”と呼ばれる波状摩耗の様相が現れる。図1は放電時の電圧／電流波形であり、油膜の絶縁破壊が起きたことで電流が流れ、電圧波形が崩れている。

この電食はインバータ機器のPWM（Pulse Width Modulation）制御で発生する軸電圧の一部が軸受の内外輪間に印加されることが原因であり、この電圧が油膜の絶縁破壊を引き起こしている。そのため軸受内で電食させない方法として、軸受の内外輪間に印加される電圧を油膜の絶縁破壊電圧以下に下げる、もしくは軸受に高い絶縁性をもつ材料を施すことによって軸受の内外輪間の通電を抑止し、絶縁破壊させないことが有効であると考えられる。

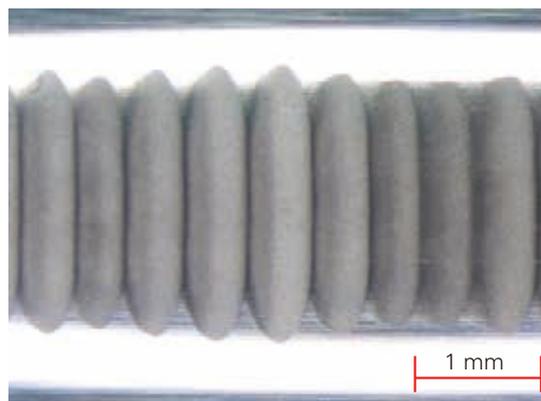


写真1 玉軸受(6206)外輪軌道面に発生したリッジマーク
Photo 1 Ridge marks on a 6206 ball bearing outer ring raceway

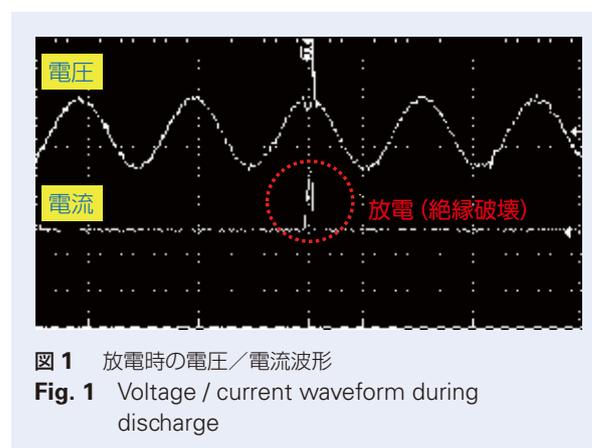


図1 放電時の電圧／電流波形
Fig. 1 Voltage / current waveform during discharge

3. 電食損傷のクライテリア

電食が発生し損傷が大きいものであれば前述した通り、軌道面や転動体にリッジマークが形成される。高い静粛性が求められる電動車においては、このリッジマークによる軌道面の摺動異音が、軸受損傷不具合としてあげられる。

HEV・EVユニット内での軸受音圧のクライテリアは各々のユニットによって異なるものの、NSKでは電食損傷による異音発生クライテリアとして、軸受単体の音圧上昇量で評価している。管理値は、これまでのモータサポート軸受の耐久評価試験終了後の異音としての異常検知の経験及び電食発生品の軸受音圧データベースより設定している。

この1つのクライテリアである音圧上昇量の妥当性を確認するため図2に示す各油膜パラメータ(Λ)における電流値の違いの電食損傷差評価を実施した。評価軸受は6206軸受(内径:30mm, 外径:62mm)を使用し、油温を変化させることにより油膜パラメータ(Λ)を変化させ、かつ放電電流値を変化させた。油膜パラメータが大きく、放電電流値が大きい条件ほど電食損傷が大きい結果である。各油膜パラメータ(Λ)の放電電流値と音圧上昇量の関係を図3に示す。図3より電食損傷が大きい条件は音圧上昇量も増加しており、この結果から音圧上昇量が電食損傷の1つのクライテリアと判断できる。

4. 焼成膜による絶縁皮膜

NSKの絶縁皮膜として樹脂の焼成膜を採用しているが、その開発皮膜品の特徴を解説する。

4.1 絶縁皮膜箇所

軸受の絶縁性を確保するためには、軸受外輪へ絶縁皮膜を施す場合、軸受外輪と相手部材との接触部すべてに施す必要があるため、外輪外径面と端面に皮膜する必要がある。これまでにNSKでも焼成膜による皮膜軸受の量産実績はあるものの、外輪外径面のみ皮膜であり端面皮膜については実績がなかった。また組立性の問題から皮膜を軸受完成品で実施する必要があるため、軸受軌道面に塗料が飛散しないように端面にムラなく皮膜する必要がある、難しいマスキング技術が要求される。さらに軸受を外輪圧入で使用する場合は、内輪内径面と端面に皮膜する必要があるため、外輪皮膜に比べさらに皮膜の塗布難易度が上がる。本開発品である絶縁皮膜は内外輪どちらでも対応できるよう開発を進めている(写真2)。

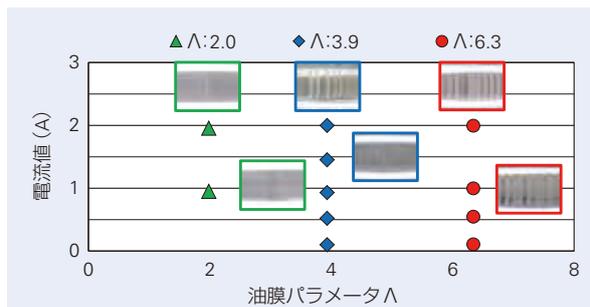


図2 各油膜パラメータ(Λ)における電流値と電食損傷差の関係

Fig. 2 Relationship between current values and electrical corrosion damage by oil film parameter (Λ)

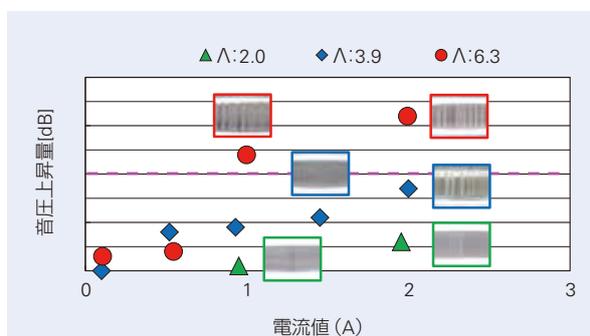


図3 各油膜パラメータ(Λ)における電流値と音圧上昇量の関係

Fig. 3 Relationship between current values and increase in sound pressure by oil film parameter (Λ)



写真2 耐電食絶縁皮膜軸受

Photo 2 Bearings with insulating coating to resist electrical corrosion

4.2 絶縁皮膜塗料について

塗料は品質安定化・塗装作業の効率化・塗装後の塗料の防護などの機能向上を目的として添加剤を加えるのが一般的である。添加剤により塗料の種々の機能向上が可能であるため、塗料には最適な添加剤を最適量調合し使用される。本開発品の絶縁皮膜塗料でも塗布工程において最適な添加剤を最適量調合し使用したいが、絶縁皮膜塗料は高い絶縁性を有する必要がある。塗布の安定性に優れた添加剤が絶縁性と背反関係にあるため、添加剤量には使用限界がある。したがって、絶縁性確保のために塗布安定性に最適とされる添加剤量を使用することができないため、溶剤希釈により通常の塗料よりも塗料粘度を下げた塗料を使用する必要がある。粘度の低い塗料においては、塗装時に外輪外径面で図4に示すような額縁現象が発生する。額縁現象は流動性と表面張力のバランスが崩れることで端部の膜厚が増加する現象である。これは溶剤希釈により流動性が増加した際に、表面張力により端部の塗料が盛り上がることに起因する。額縁現象が発生すると皮膜後の寸法が安定せず、ハウジング挿入時に皮膜が剥離し絶縁性能が損なわれる。このように最適量の添加剤を使用できない絶縁皮膜塗料は塗装難易度が高くなる。

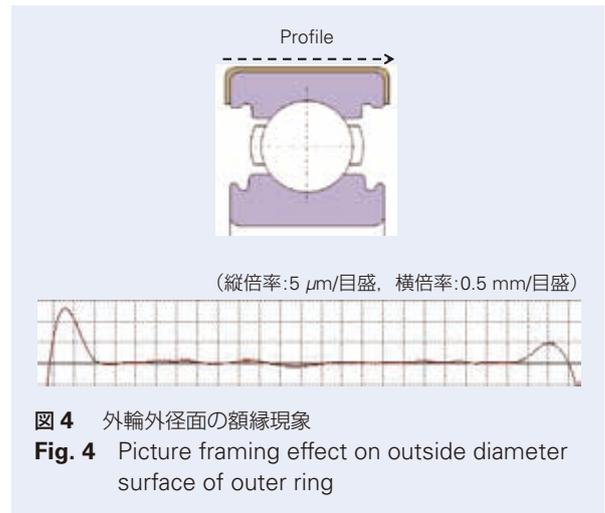


図4 外輪外径面の額縁現象
Fig. 4 Picture framing effect on outside diameter surface of outer ring

4.3 絶縁性と皮膜膜厚について

HEV・EVユニット内の軸受の内外輪間に発生する電圧は交流電圧であるため、軸受を絶縁しても微量なコンデンサ電流が流れる。このコンデンサ電流によって軸受の軌道面・転動体には微小な放電が発生することが確認されている。コンデンサ電流は式(1)で計算でき、インバータ制御周波数と絶縁皮膜軸受の静電容量で決まる。

$$I_c = 2\pi f \times CV \dots \text{式(1)}$$

I_c : コンデンサ電流 [Arms]

f : 周波数 [Hz]

C : 皮膜軸受の静電容量 [F]

V : 電位 [Vrms]

本開発品の絶縁皮膜の膜厚は数十 μm であり、HEV・EV用駆動モータ用軸受で想定される電圧・周波数ではコンデンサ電流が一部流れる。そのため絶縁皮膜の膜厚は図5に示すようにコンデンサ電流がサチレーションする領域で設定をしており、またそのコンデンサ電流値レベルでは電食損傷はするものの軸受機能に影響を及ぼさないレベルに抑制できることを確認している。

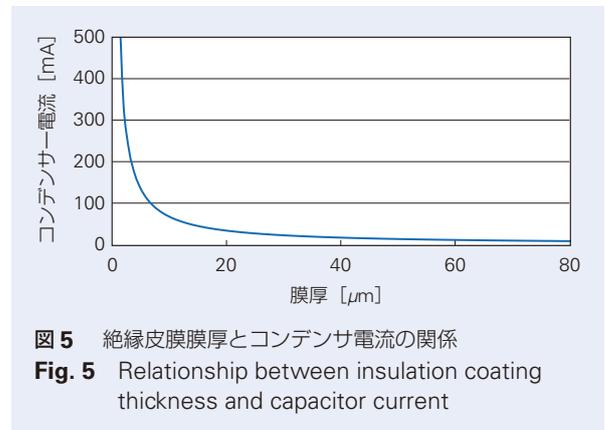


図5 絶縁皮膜膜厚とコンデンサ電流の関係
Fig. 5 Relationship between insulation coating thickness and capacitor current

本開発品の絶縁性確認評価は次のように行った。評価軸受は 6206 軸受 (内径 : 30 mm, 外径 : 62 mm) を使用し, 軸受の内外輪間に電圧 : 50 V_{p-p}, 周波数 : 100 kHz の正弦波を時間 : 20 hr 印加した。比較として 6206 標準軸受で電圧 : 3 V_{p-p}, 周波数 : 1 kHz, 時間 : 20 hr を実施し結果を **図 6** に示す。マイルド条件で試験を実施した標準軸受では, 外輪軌道面にはリッジマークが発生し, 軸受単体音圧上昇量は管理値以上であるが, 絶縁皮膜軸受は標準軸受より厳しい条件にも関わらず, 内外輪軌道面に電食損傷による異常摩耗は認められず, 音圧上昇量は管理値以下と軸受機能に影響を及ぼさないレベルにまで電食損傷を抑制している。

4.4 耐重荷重性

本開発品である絶縁皮膜軸受は HEV・EV 用駆動モータ支持軸受のみならず, ギア荷重の負荷を受ける支持軸受でも耐えうるよう開発を進めている。そのため荷重負荷による絶縁皮膜軸受のインピーダンス低下率について評価を行った。評価軸受は 6206 軸受 (内径 : 30 mm, 外径 : 62 mm) を使用し, ラジアル荷重は評価軸受の基本動定格荷重の 5 ~ 50 % の値を使用し, 基本定格荷重の 5 % にあたるラジアル荷重を

負荷した時のインピーダンスに対する各ラジアル荷重負荷時のインピーダンスの低下率を測定した。測定は動的時に形成される油膜のインピーダンスの影響を除外するため静的評価で実施した。その結果を **図 7** に示す。インピーダンスの低下率は 20 % 以下であり, 基本定格荷重の 50 % 時でも本開発品は十分にインピーダンスがあると判断した。

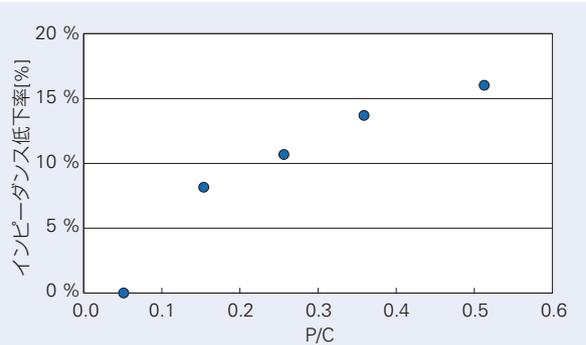
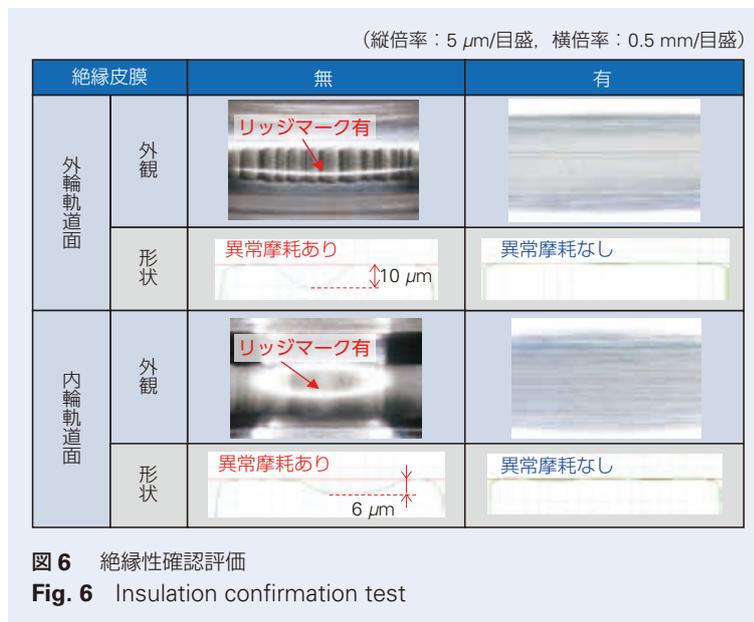


図 7 荷重と絶縁皮膜軸受インピーダンス低下の関係
Fig. 7 Relationship between load and decrease in impedance of bearing with insulating coating



4.5 クリープ環境下での絶縁持続性

HEV・EV用駆動モータ用軸受において外輪がすきまばめの場合、モータロータの振れ回りラジアル荷重(偏心荷重)によって外輪外径とハウジング内径の周長差から本来回転しないはずの外輪が回転する“クリープ”と呼ばれる現象が発生する¹⁾。このようなクリープ環境下においても本開発品の絶縁皮膜は絶縁性を保持する必要がある。そのため絶縁皮膜の絶縁持続性確認のため次のような評価を行った。

評価軸受は6206軸受(内径:30mm, 外径:62mm)を使用し、振れ回りラジアル荷重を負荷し評価中常に外輪をクリープさせ続け、軸受の内外輪間に電圧を印加し絶縁性が維持されるかを確認した。今回実施した条件は図8で示すように6206標準軸受で同条件の評価を行うと外輪が2万回転クリープ時にアルミハウジングは60μm程度摩耗することを事前に確認している。この摩耗量は一般的に異常摩耗と判断されるため今回の評価条件は十分厳しい条件と言える。今回は3万回転クリープ後の軌道面の電食損傷結果を図9に示す。絶縁皮膜軸受は標準軸受よりシビア条件にも関わらず、大電流の放電を起こすことなく絶縁性を維持した。また、内外輪軌道面に電食損傷による異常摩耗は認められず、軸受機能に影響を及ぼさないレベルにまで電食損傷を抑制している。

5. あとがき

本稿では、NSKが開発したHEV・EV用駆動モータ用軸受の耐電食アイテムの一つである絶縁皮膜軸受開発の取組について紹介した。

NSKは、本稿で紹介した耐電食アイテムである絶縁皮膜に加え、軌道輪に樹脂モールドを施す絶縁対策の開発も進めている。また、絶縁対策アイテムだけではなく、従来の導電対策アイテムとなる導電グリース・導電シールの改良、またそれに代わる新たな導電対策アイテムも開発中であり、絶縁・導電双方からの耐電食マネージメントを目指している。

今後のカーボンニュートラルな社会を実現するために、急速にHEV・EVなどの電動車が普及することは明白である。軸受への要求事項も日々変化しているため、NSKではユーザーの使用環境を十分に把握し、市場のニーズに応える商品開発を継続的に推進・提案していくことでHEV・EVの信頼性の向上に貢献していく。



図8 外輪クリープによるハウジング摩耗(標準軸受)
Fig. 8 Housing wear due to outer ring creep (standard bearing)

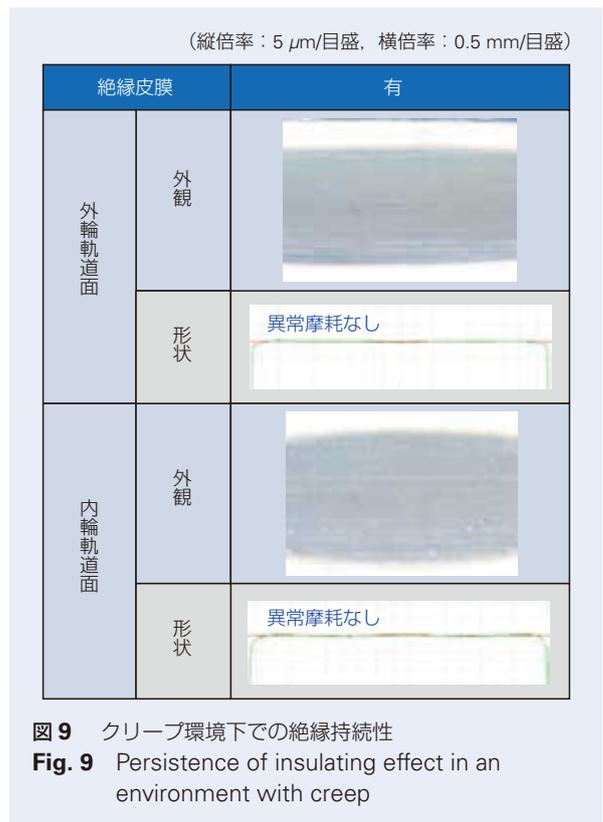


図9 クリープ環境下での絶縁持続性
Fig. 9 Persistence of insulating effect in an environment with creep

参考文献

1) 岩永泰弘, “HEV・EVパワートレイン用軸受の最新技術動向”, 月刊トライボロジー, 2019.10.

カーボンニュートラルに貢献するハブユニット軸受



加藤 明治*

加藤 明治

How Hub Unit Bearings Contribute to Carbon Neutrality

M. Kato

Global warming continues to progress year by year, making countermeasures urgently needed. Carbon neutrality is a crucial first step in reducing the percentage of greenhouse gases in the atmosphere that cause global warming.

Carbon neutrality is achieved by balancing carbon dioxide emissions from human activities with their removal from the air. As automobiles are a major source of emissions, improving their energy efficiency is a major area of focus.

Here, we describe how hub unit bearings, as critical components that support the wheels of automobiles, help to realize carbon neutrality.

1. はじめに
2. ハブユニット軸受のフリクション
3. 軸受内部フリクションの低減
 - 3.1 軸受内部グリース 第二世代低フリクショングリース
 - 3.2 低フリクション保持器
4. シールフリクションの低減
 - 4.1 新開発シールグリース
 - 4.2 スリングシール
5. 内部フリクション低減とシールフリクション低減の効果
6. その他の手法による CO₂ 削減
7. CO₂ 低減効果
8. おわりに

1. はじめに

近年、大気汚染や地球温暖化をはじめとする地球環境問題への対策として、CO₂ 排出量削減や燃費・電費の改善が自動車産業にとって大きな課題となっている。

2020年10月、日本政府は2050年までに温室効果ガスの排出を全体としてゼロにする、カーボンニュートラルを目指すことを宣言した¹⁾。

BEV、HV、PHV、FCVといった電動車は近年急速に普及が進んでおり、日本政府は2035年まで、各国政府は2030年～2040年までに新車販売の100%

を電動車とすることを掲げている。

電動車はバッテリーや燃料電池をエネルギー源として、モーターで車輪を駆動する自動車である。バッテリーの充電には発電所から各家庭や事業所に配電された電気を用いるため、発電に化石燃料を使用することについて改善が必要で、また、風力・水力等の再生エネルギーには発電量の制約があることから、電力使用量を低減するためには電費の改善が必要である。

また、バッテリーの充電は、自宅や事業所に充電設備

* 自動車軸受技術センター、シャシ軸受技術部

があれば就寝時や夜間に時間を気にせず充電することができるが、連続して運転したい場合には急速充電でも30分必要であり、ガソリンや軽油の給油に比べて長い時間を必要とする。そのため、一度の充電で走行できる航続距離の延長が現状の課題として取上げられている。

航続距離 (km) の改善方法には大きく分けてバッテリーの大容量化 (kWh) と電費 (km/kWh) の向上がある。バッテリー容量を増やすと車重が重くなり、電費が悪化することに加えてバッテリーを生産するために資源とエネルギーを消費するので、単純にバッテリー量を増やすのは得策ではない。

航続距離を改善するための電費向上の一つの手法として回生ブレーキがある。従来の内燃機関車では、減速時には運動エネルギーをブレーキまたはフリクションロスとして熱エネルギーに変換して空気中に捨てていた。回生ブレーキは減速時にモータを発電機として利

用するもので、走行中の自動車を持つ運動エネルギーを電気エネルギーに変換し、バッテリーを充電する手法である。そのため、転がり抵抗の低減による走行時の燃費・電費向上に加えて、回生による運動エネルギーの回収量を増加させるために、低フリクション化のニーズがさらに高まっている。

NSKは、2035年度にScope1およびScope2のCO₂排出量を実質ゼロにするカーボンニュートラル実現の目標を設定した。図1に示すように、「つくる」=技術開発と生産、「つかう」=商品とサービスの4つの観点からCO₂排出量を削減する。

NSKは自動車向けに、タイヤを支えるハブユニット軸受、トランスミッション等の駆動系軸受、エンジン補機類やEV用のモータに使用される軸受を生産している。本稿では、ハブユニット軸受における環境貢献型製品の開発について解説する。



図1 カーボンニュートラルの実現
 Fig. 1 Realization of a carbon-neutral society

2. ハブユニット軸受のフリクション

図2にハブユニット軸受に要求される機能を示す。近年、更なる高信頼性、高剛性、低フリクション・軽量化の要求が高まっている。一方、高信頼性と低フリクションは相反し、高剛性は低フリクション、軽量化と相反する。

信頼性および高剛性を維持しつつ、フリクションを低減する取り組みについて解説する。

図3に示すように、ハブユニット軸受のフリクションは玉、軌道面、保持器、内部グリスによる「内部フリクション」と、泥水の浸入を防ぐシールの「シールフリクション」に分けることができる。軸受のフリクションはおよそ内部フリクションが50%、シールが50%である。

以下に、内部フリクションとシールフリクションの低減アイテムについて述べる。

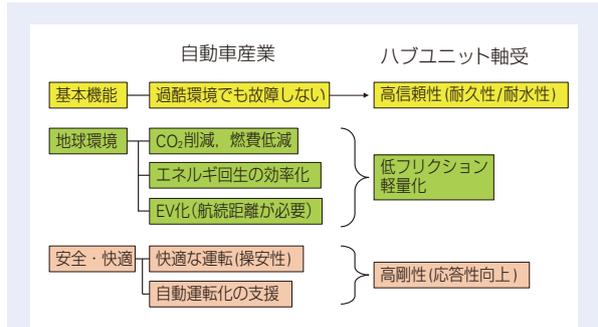
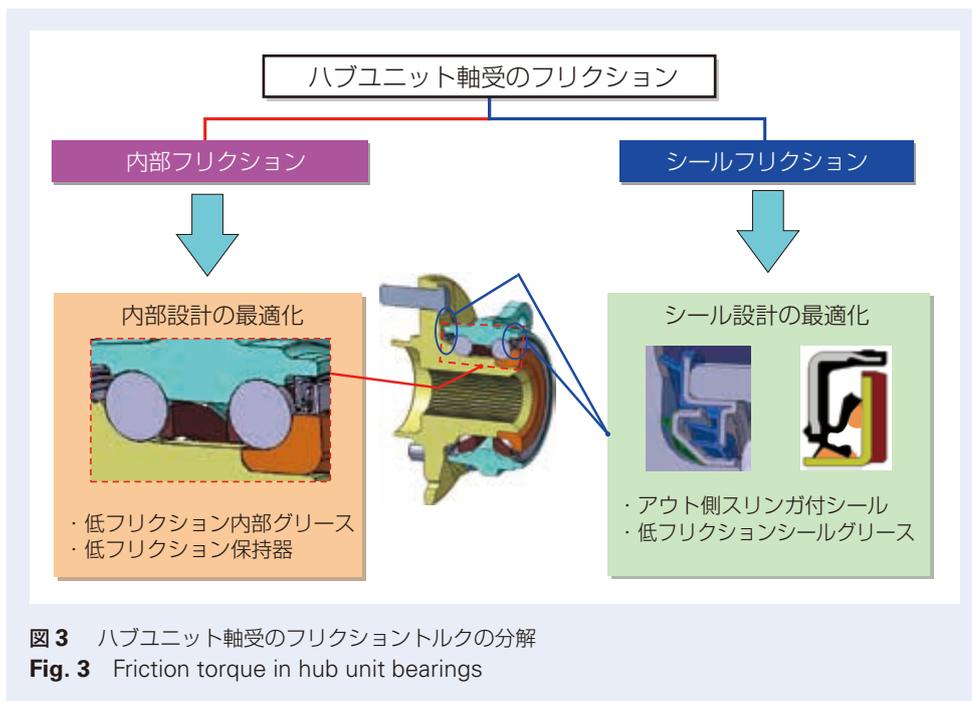


図2 ハブユニット軸受に要求される機能
Fig. 2 Functionality required of hub unit bearings



3. 軸受内部フリクションの低減

図4に示すように、ハブユニット軸受の内部には転動体(玉またはころ)、軌道面、保持器、グリースが存在する。軸受内部フリクションは「転がり抵抗」と「かくはん抵抗」に分けることができる。

転がり抵抗は玉と軌道面の間の接触面で、基油のせん断によって生じる抵抗であり、低速・高荷重で使用されるハブユニット軸受の内部フリクションは転がり抵抗が支配的である。

一方、かくはん抵抗は、玉と保持器が回転する際にグリースを押し回すことで発生する抵抗である。基油の低粘度化により転がり抵抗が小さくなることで、かくはん抵抗の比率が大きくなることから、新開発軸受内部グリースではかくはん抵抗の低減を図っている。

3.1 軸受内部グリース 第二世代低フリクショングリース

グリースは、主に基油、増ちょう剤、添加剤の3つの成分で構成される。基油は転動体と軌道面の間に油膜を形成して潤滑を行うものであり、製造方法により鉱油と合成油に分類される。従来は安価な鉱油を用いたグリースが主であったが、近年は低フリクション化のため、温度に対して粘度変化の小さい合成油が使用されることが増えている。

増ちょう剤は、基油を保持して半固体化するための

ものであり、スポンジのように基油を保持する。増ちょう剤によってグリースが流出せずその場に留まり、転動体と軌道面の間を潤滑するための基油を供給する。

添加剤は、酸化防止剤、錆止め剤、摩耗防止剤、摩擦低減剤、耐水処方添加剤等があり、グリースの各種機能を向上させるために配合される。

転がり抵抗の低減にはグリースの基油粘度を下げるのが有効であるが、基油粘度を下げると大荷重が負荷されて軸受が高温になる時に油膜が薄くなり、玉と軌道面の金属接触を生じる懸念がある。

通常走行での外輪表面温度 40 ~ 50 °C 時の低トルク性と、高温時(外輪表面温度 80 °C 以上)の耐久性を両立させるため、第一世代低フリクショングリース、第二世代低フリクショングリースでは温度による粘度の変化が小さい(粘度指数が大きい)化学合成油を基油に使用している。

柔らかい(ちょう度が大きい)グリースは手触りでは抵抗が小さい印象があるが、実際には走行時に玉と保持器で転走面の外に押し回された後に再び元の位置に戻り(チャーニング性)、玉と保持器に接触して抵抗を発生し続ける。一方、硬い(ちょう度が小さい)グリースは、手触りでは抵抗が大きいものの、玉と保持器で転走面の外に押し回されたグリースはその場に留まるため(チャンネルリング性)、グリースが再び押し回されることがなく、かくはん抵抗を小さくすることができる。

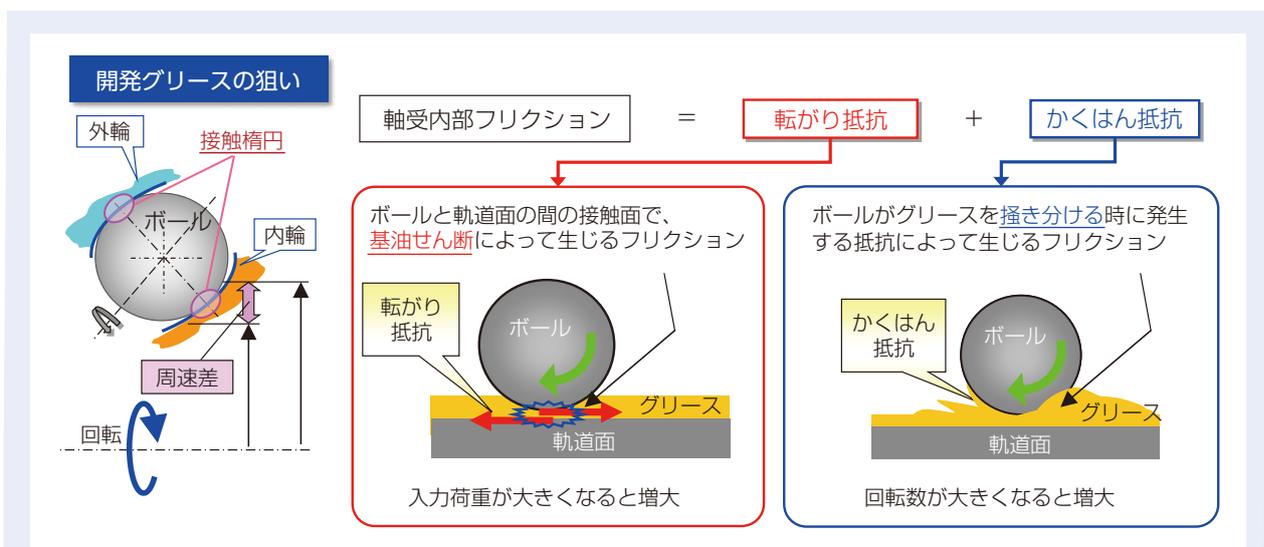


図4 ハブユニット軸受のフリクショントルクの分解
Fig. 4 Bearing internal friction torque

また、従来のハブユニット軸受の内部グリスには耐熱性の高いウレア系の増ちょう剤を用いている。第二世代低フリクショングリスは、より繊維が細かい増ちょう剤を用いて基油の保持能力を高めることで、グリスの硬さを維持しつつ増ちょう剤量を減らして、かくはん抵抗の低減を達成した。

第一世代低フリクショングリスと第二世代低フリクショングリスの性能比較を図5に示す。第二世代低フリクショングリスは、高速高負荷耐久性と、耐低温フレッチング性(※)を維持しつつ、30%の低フリクション化を達成した。

※ハブユニット軸受のフレッチングとは、自動車を貨物列車やトラックで輸送する際にタイヤが回転せず振動が加わることで、軸受の転動体と軌道面の間で油膜切れによる金属接触が生じて微小摩耗が発生する現象である。特に、冬季寒冷地での長距離輸送において問題となりやすい。

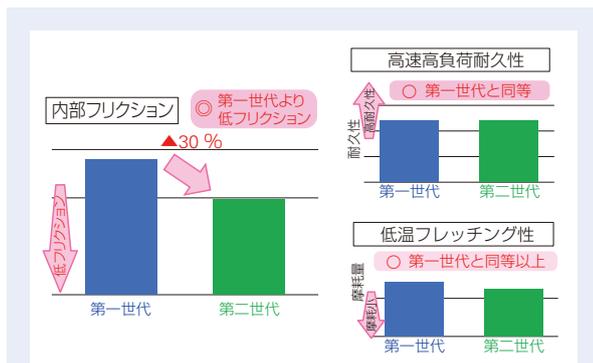


図5 第二世代低フリクショングリスの性能
Fig. 5 Performance of 2nd generation low-friction grease

3.2 低フリクション保持器

従来の保持器と低フリクション保持器を図6に示す。従来の保持器は玉の間に柱があり、玉と保持器間にグリスかくはん抵抗が発生する。また、保持器外径と外輪内径の間、保持器内径と軸外径の間でもかくはん抵抗が発生する。

新開発の低フリクション保持器は、

- ・ポケット間の柱除去によるかくはん抵抗の低減
- ・外径寸法、内径寸法の変更によるかくはん抵抗低減により、軸受内部フリクションを低減する。

図7に、低フリクション保持器によるフリクション低減効果を示す。玉ポケット間の柱除去と寸法変更により11%の内部トルク低減を達成した。

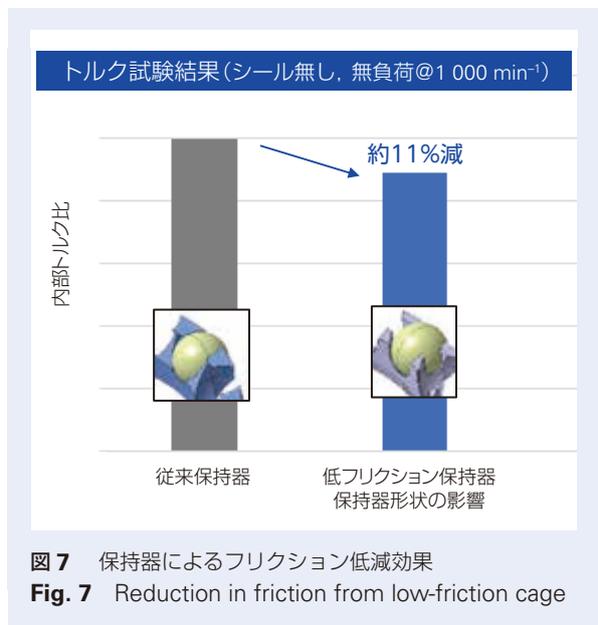


図7 保持器によるフリクション低減効果
Fig. 7 Reduction in friction from low-friction cage



図6 従来の保持器と低フリクション保持器
Fig. 6 Conventional cage and low-friction cage

4. シールフリクションの低減

ハブユニット軸受は自動車の車輪を支える軸受であり、タイヤが跳ね上げた泥水がハブユニット軸受にかかる過酷な環境で使用されるため、ハブユニット軸受内部への泥水浸入を防止することはシールの最も重要な機能である。

一方、耐泥水性を高めるために接触リップの数を増やすこと、リップの接触力を強めることはシールのフリクションを大きくするため、耐泥水性と低フリクション化の両立がシールの技術課題である。

シールのフリクショントルクは、シールリップ摺動部の摩擦力 F_1 とグリースのかくはん抵抗 F_2 を足し合わせたものである。(図 8)

摺動部の摩擦力 F_1 は $F_1 = \mu N$ で求めることができ、摩擦係数 μ はシールゴム材、グリース、摺動面の表面性状で決まり、リップ反力 N はシールゴム材、シール形状によって決まる。

グリースのかくはん抵抗はグリースの粘度、チャネリング性やグリース量の影響を受ける。これらの要素に着目し、シールフリクションの低減に取り組んでいる。

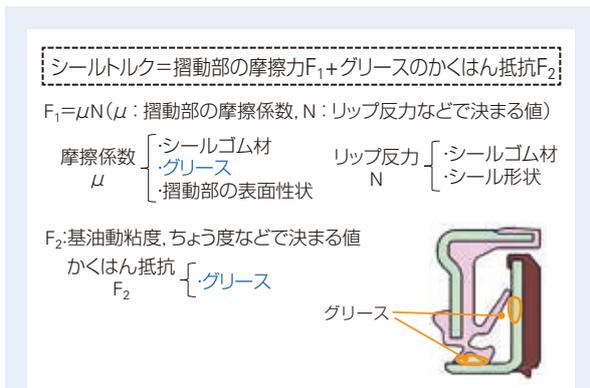


図 8 シールトルクの分解
Fig. 8 Components of seal friction torque

4.1 新開発シールグリース

シールグリースはリップと摺動面を潤滑するものであり、シールグリースは前述の式の摩擦係数に大きく影響する。グリースの基油動粘度を小さくすることで摩擦係数を小さくすることができるが、動粘度の小さい基油は基油分子同士の相互作用が小さく流動性が高いため、油膜切れを生じやすくシールから泥水が浸入しやすくなる。

新開発グリースは基油粘度を下げた摩擦係数を小さくしたうえで、極性ポリマーを基油に配合した。

図 9 に、極性ポリマーの作用を示す。ポリマー鎖の絡み合いで基油分子を引き留め、泥水が触れた際の油膜破断を防ぐことと、極性ポリマーとシールリップゴム材の摺動部表面の相性が良く、濡れ性が良くなることで摺動部に油膜とグリースが介在しやすくなる。

図 10 に、新開発シールグリースのトルク低減効果を示す。シールフリクションの 25% 低減と、シール性の 50% 向上を同時に達成することができた。

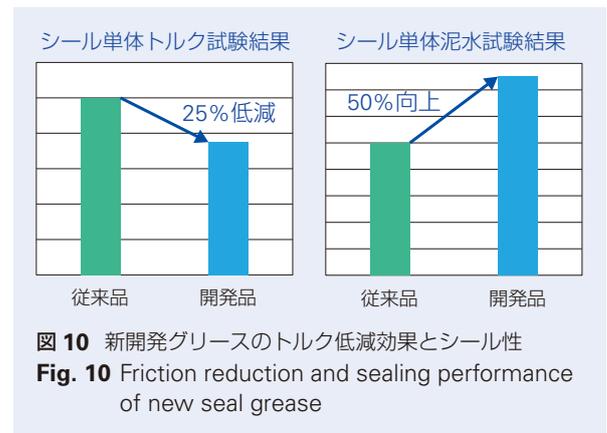


図 10 新開発グリースのトルク低減効果とシール性
Fig. 10 Friction reduction and sealing performance of new seal grease

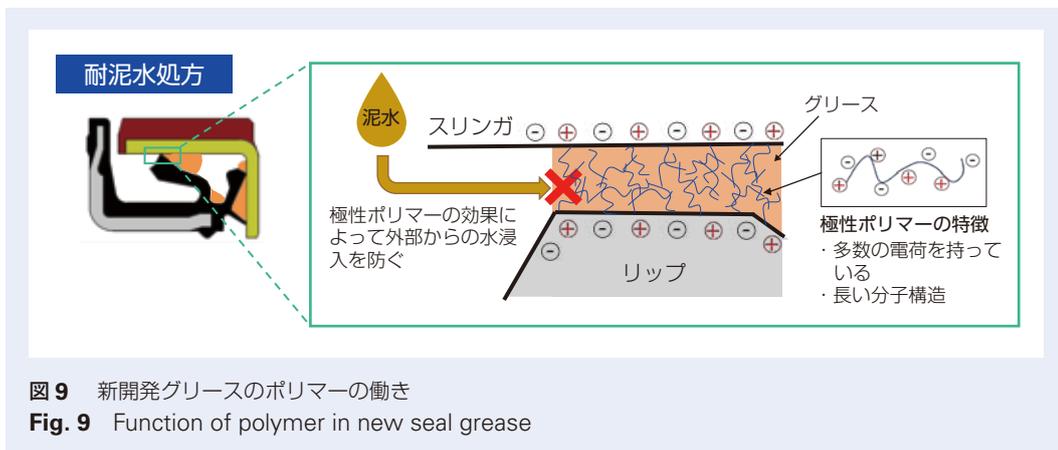


図 9 新開発グリースのポリマーの働き
Fig. 9 Function of polymer in new seal grease

4.2 スリンガシール

従来の第三世代ハブユニット軸受は、車両外側シールのシールリップが直接シャフト外径を摺動する構造のシールを用いている。

一方、車両内側のシールには ABS や横滑り防止装置などの車両制御システムのために車輪の回転速度信号を発生する磁気エンコーダが内輪に嵌合しており、シールリップは磁気エンコーダの芯金であるスリンガの表面を摺動する。

NSK では、車両外側のシールにもスリンガを用いる構造を開発している。(図 11) 車両外側のシールにもスリンガを用いることで下記のメリットがある。

- ・ラビリンス構造を複雑化し、シールリップから泥水を遠ざけることができる。
- ・シールリップに到達する泥水量を減らすことで、シールの接触リップ数を例えば 3 枚から 2 枚に減らすことができる。
- ・接触リップの枚数を減らすことで、低フリクション化ができる。

図 12 に、従来品シールとスリンガシールのトルク比較を示す。シール性を維持しつつ、40 %のトルク低減を達成した。

5. 内部フリクション低減とシールフリクション低減の効果

内部フリクション低減アイテムと、シールフリクション低減アイテムをすべて盛り込むことで、現行品と比べてフリクションを約 30% 低減できる見込みである。



図 11 スリンガシールと従来型シール
Fig. 11 Slinger seal and conventional seal

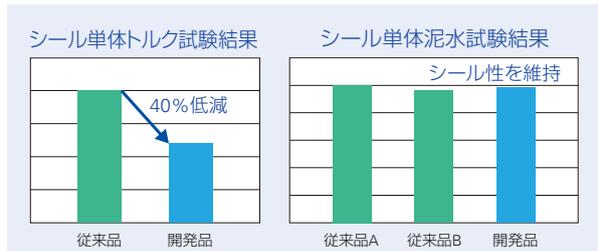


図 12 スリンガシールのトルク削減効果とシール性
Fig. 12 Friction reduction and sealing performance with slinger seal

6. その他の手法による CO₂ 削減

ハブユニット軸受の CO₂ 削減への取り組みは、低フリクション化による損失低減以外にも原材料の使用量低減、信頼性向上による長寿命化、カーボンニュートラルに直結するバイオマス素材の開発等がある。

その一例として、バイオマスプラスチックを用いた保持器の開発を完了した。従来のハブユニット軸受の保持器は化石由来のポリアミド 66 を使用している。一方、バイオマスプラスチックは大気中の CO₂ を吸収して成長した植物を原料とするため、焼却しても大気中の CO₂ 濃度を上昇させずカーボンニュートラルに貢献する。図 13 に、化石由来プラスチックとバイオマスプラスチックの違いを示す。

NSK では 100 %植物由来のバイオマスプラスチックのうち、化学構造がポリアミド 66 に近いポリアミド 410 を選定した。材料特性評価と軸受回転試験を行い、ポリアミド 410 がポリアミド 66 と同等の性能を有することを確認した。

ポリアミド 410 を用いることで、ポリアミド 66 と比較してライフサイクル全体での CO₂ 排出量を 90 % 削減可能である。



図 13 化石由来プラスチックとバイオマスプラスチックの CO₂ 排出における違い
 Fig. 13 Difference in CO₂ emissions between fossil-based and bio-based plastics

7. CO₂ 低減効果

ここまでで紹介した低フリクションアイテムの CO₂ 削減量を示す。2021 年度の集計結果より、低フリクションアイテムを投入した NSK のハブユニット軸受の CO₂ 削減量合計は 330 kt/年である。

また、軸受の軽量化による原材料使用量低減効果で 5 kt/年、耐水グリースの適用による市場での部品交換数量の低減効果で 6 kt/年の CO₂ が削減できるため、ハブユニット軸受全体の CO₂ 削減量は 341 kt/年である。

341 kt/年の CO₂ 削減量を持つ意味について考察する。日本の家庭における年間の CO₂ 排出量は 2.88 t²⁾ であることから、341 kt/年の CO₂ 削減は約 11 万 8 000 世帯分の CO₂ 排出量に相当する。

また、杉の木約 71 本が 1 年間に吸収する CO₂ 量が 1 t であるため、341 kt/年の CO₂ 削減は杉の木 2 400 万本に相当する。森林の杉の木が 1 ヘクタールあたり 900 本であると仮定すると、約 26 900 ヘクタール(269 km²)の森林面積に相当し、東京 23 区の約 43 %に相当する。

8. おわりに

ハブユニット軸受がカーボンニュートラルに貢献するための技術について解説した。地球温暖化の主な原因は空気中の CO₂ 濃度の増加であると考えられており、地球温暖化を止めるためには CO₂ 排出量の低減、カーボンニュートラルの達成が必要である。

NSK はトライボロジー技術とモノづくり技術によって、環境貢献型製品を提供するとともに、燃料や電力の使用量削減、技術革新、再生可能エネルギー活用で CO₂ 排出量削減の取り組みを進める。

更には、環境に優しい材料の開発と採用、環境負荷が少ない物流、NSK 製品の使用や廃棄など、サプライチェーン全体での CO₂ 排出量の削減に貢献する。

参考文献

- 1) 環境省、「カーボンニュートラルとは」、脱炭素ポータル、https://ondankataisaku.env.go.jp/carbon_neutral/about/ 2022 年 4 月 26 日閲覧。
- 2) 環境省、令和 2 年度 家庭部門の CO₂ 排出実態統計調査(確報値) https://www.env.go.jp/earth/ondanka/ghg/kateiCO2_R2_1_1.pdf

磁歪式トルクセンサシステムの開発

大寺 貴裕*, 福田 晃大*, 小野 潤司**



大寺 貴裕



福田 晃大

Development of Magnetostrictive Torque Sensor

T. Odera, K. Fukuda, J. Ono



小野 潤司

The drive shaft of a vehicle transmits not only torque from the engine or motor, but also reaction torque from the wheel. If accurately measured, information on the torque of the drive shaft could be utilized in powertrain control and vehicle condition monitoring to extend cruising range, increase ride comfort, and ensure vehicle safety.

Here, we introduce a developed contactless torque sensor that uses inverse magnetostriction. With a compact and robust structure for powertrain applications, the developed torque sensor offers superior mountability. The sensor demonstrated accurate torque measurements for ± 1000 Nm of torque input on a shaft with an outer diameter of 40 mm within a 4 % error.

- | | |
|---|--|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. まえがき 2. システムの概要 <ol style="list-style-type: none"> 2.1 システムの構成 2.2 トルク検出の流れ 2.3 トルク検出性能と精度 2.4 システム開発の課題 | <ol style="list-style-type: none"> 3. 各構成要素の開発 <ol style="list-style-type: none"> 3.1 センサヘッドの開発 3.2 シャフトの開発 3.3 演算器の開発 4. トルクセンサシステムの検証 5. あとがき |
|---|--|

1. まえがき

近年、自動車を取り巻く情勢として、CASE と呼ばれる技術革新が起こっており、自動運転技術の進歩や、環境規制に対応するための電動化への動きが加速している。安全性や快適性の向上、さらに環境負荷の低減を実現するために、自動車には様々なセンサが取り付けられるようになり、それらの情報が車両制御に活用されている。

NSK は、自動車の制御情報として、駆動軸を伝達するトルクに着目した。エンジンやモータで発生した力は、トルクとして、変速機や減速機を通じてタイヤまで伝達される。また逆に、路面の凹凸などからタイヤが受ける反力は、変速機や減速機へ伝わる。これら

のトルクを把握し、制御や状態監視に活用することで、航続距離、快適性や安全性の向上が期待できる。市販のトルクセンサはベンチでの利用を想定したシステムであるため、自動車への量産適用には向かなかったが、NSK では、パワートレインにも実装可能な磁歪式トルクセンサシステムを開発した。このトルクセンサは、パワートレインの駆動軸とは非接触である上、小型かつ堅牢な構造を持ち、搭載性に優れている。

本稿では、NSK が開発した磁歪式トルクセンサシステムの概要、検出原理および、性能検証について紹介する。

* NSK ワーナー株式会社, 技術本部, 製品開発部
** 自動車技術総合開発センター, 新製品開発部, 製品開発室

2. システムの概要

2.1 システムの構成

写真1および図1に本トルクセンサシステムの構成を示す。本トルクセンサシステムは、センサヘッド、シャフト、演算器の3つの要素により構成される。センサヘッドは写真1に示されるリング状の部品であり、測定対象のシャフトを中に通して用いる。センサヘッドは、シャフトと非接触に保持されるため、回転する動力伝達軸のトルク検出が可能である。また、センサヘッドの内部には、フレキシブルプリント基板 (Flexible Printed Circuits, 以降 FPC と呼ぶ) が備えられている。FPC には、コイル状の銅線パターンが形成されており、そこへ電流を流すと、シャフトとの間に磁界が発生する。

演算器は、主にセンサヘッドを駆動する機能と、センサヘッドからの信号をトルク値に換算する機能を備え、車載コントローラ等の上位の制御装置へトルク値を出力する。

2.2 トルク検出の流れ

図2に、本トルクセンサシステムによるトルク検出の流れを示す。本トルクセンサシステムでトルクを検出する際、はじめに演算器がセンサヘッドへ電流を流す(①)。この電流により、センサヘッド内部のFPCコイルが励磁され、シャフトとの間に磁界が発生し、シャフトの表面に磁束が通る(②)。この状態で、シャフトがねじられ(トルクが負荷され)、シャフトに応力が発生すると、逆磁歪効果と呼ばれる現象が発生する¹⁾。逆磁歪効果とは、鉄などの磁性体に外力が加わることで結晶構造が歪むと、磁気特性が変わる現象である。この逆磁歪効果により、トルクが負荷されたシャフトの透磁率が変化(③)する。シャフトの透磁率が変化すると、センサヘッド内部のFPCコイルが演算器の励磁電流によって生成している磁束の量も変化し、それによりFPCコイルのインダクタンスが変化(④)。インダクタンスの変化は電気信号として取り出すことができるため、演算器にて信号増幅やフィルタリング等の信号処理を施すことで、トルクに応じて変化する電気信号として出力(⑤)できるようになる。



写真1 磁歪式トルクセンサの外観
Photo 1 Magnetostrictive torque sensor

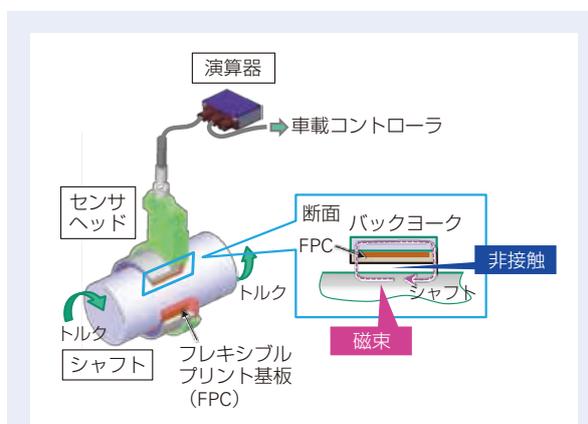


図1 開発した磁歪式トルクセンサシステムの構成
Fig. 1 Configuration of components in developed magnetostrictive torque sensor

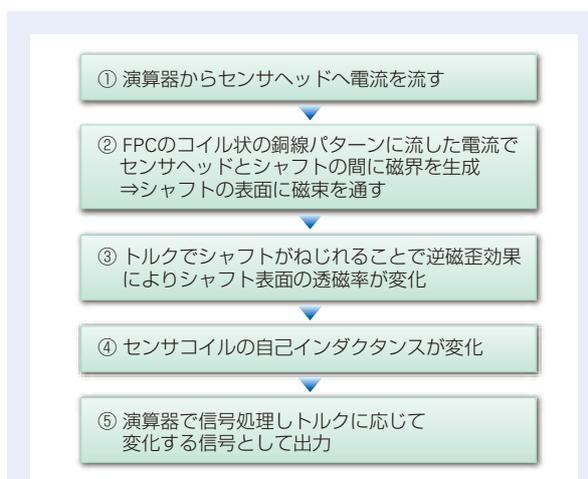


図2 磁歪式トルクセンサシステムによるトルク検出の流れ
Fig. 2 Flowchart of torque detection by sensor

2.3 トルク検出性能と精度

本節では、本トルクセンサシステムのトルク検出性能と精度について述べる。本トルクセンサシステムは、2.2節で述べた方法で、検出トルクに比例したアナログ電圧を出力することができる。このとき、入力トルクとセンサ出力の比である「トルク感度」が高いほど、センサはノイズや誤差の影響を受けづらく、優れた検出性能を有すると言える。システムとして高いトルク感度を実現する手段としては、シャフトへの表面処理の適用、鋼種の選定、シャフト径や肉厚の最適化が挙げられる。

また図3に、本トルクセンサシステムのトルク検出における主な誤差を3つ示す。

第一の誤差は図3(1)に示すように、トルク負荷による出力変化誤差であり、ヒステリシスと非直線性誤差が含まれる。このヒステリシスは、シャフトの磁歪特性による影響と考えられる。

第二の誤差は図3(2)に示すように、シャフト回転時の誤差であり、センサ出力信号電圧が回転に伴って周期的に変動する。この現象は、シャフト表面の透磁率が、周方向に不均一である場合に生じるものと考えられる。

第三の誤差は図3(3)に示すように、使用環境温度が変化する際に生じる誤差である。本トルクセンサシステムでは本質的に、温度によるセンサ出力の変動が不可避である。これは、センサヘッド内部で磁界を作り出すコイルに銅が使われており、銅の電気抵抗率が

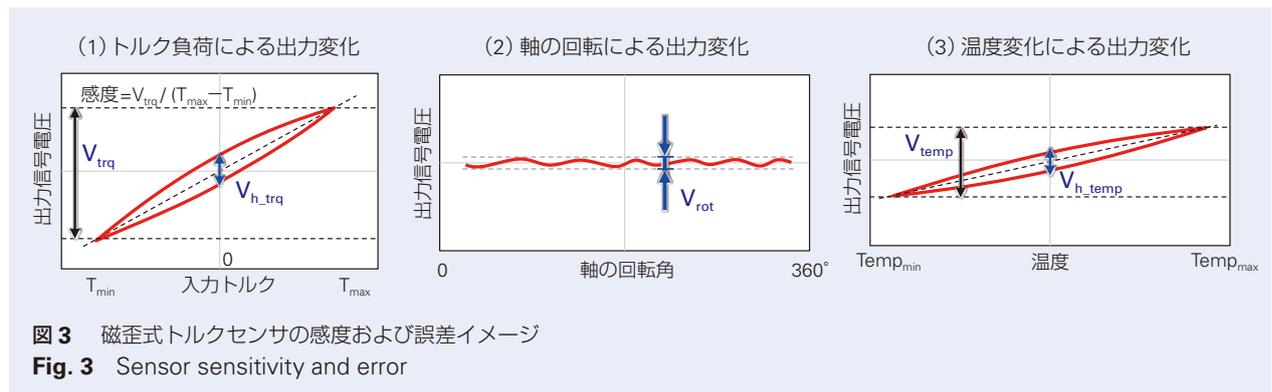
温度により変化するためである。そこで本トルクセンサシステムでは、演算器にセンサ温度を推定する回路を搭載し、その信号を活用して温度補償を行うことで、自動車用途として想定される $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ の温度範囲への適用を可能とした。しかしながら、銅自体の電気抵抗率変化は、実用的な温度範囲においては線形と見なせるものの、センサ内部のFPCコイルを構成する各部品はそれぞれ異なる線膨張係数による膨張と収縮を生じるため、温度による出力の変動は完全な線形とはならず、前記のように演算器で温度補償を施しても、ヒステリシス誤差や非直線性誤差が残る。

本トルクセンサシステム開発においては、これら3つの誤差の合計をシステムの総合精度と定義した。

2.4 システム開発の課題

本トルクセンサシステム開発の狙いは、自動車パワートレインを想定した実機環境への適用である。実機環境として考慮すべき環境特性は多岐に渡る。例えば、鉄粉などの異物が含まれる油中、広範囲の温度変化、振動、衝撃、電磁両立性、高負荷トルクやシャフトの高速回転などが挙げられる。

また上記以外に、2.3節で述べた誤差を低減し、高精度なトルク測定を実現することも重要である。本開発では、2.3節で定義した総合精度の暫定目標として、 $\phi 40$ の中実シャフトで $\pm 1\,000\text{ Nm}$ （シャフトの最大応力 79.6 MPa ）を対象に、5%以内となるよう取り組んだ。



3. 各構成要素の開発

3.1 センサヘッドの開発

図4に開発したセンサヘッドを示す。センサヘッドの最も内側には樹脂製ボビンが配置され、その外径面に、トルク検出に用いるFPCが巻き付けられている。FPCの外側には、磁束の漏れを抑えるバックヨークが配置され、樹脂製ボビンと共に、樹脂製アウトカバラーで一体成形する。

センサヘッドの内径はφ41.5 mmである。本トルクセンサシステムで対象とするシャフトの外径φ40 mmに対し、片側0.75 mmのクリアランスを確保し、実機シャフトの振れや曲がりによる干渉に配慮した。

センサヘッドは小型かつ薄肉な構造となるよう、実機取り付け時に案内面となるバックヨークの外径からボビンの内径までを5 mmの厚さとし、センサヘッドの軸方向全幅は28 mmを実現した。

また開発品は、鉄粉等の異物を含む油中での使用を想定し、リップシールによる封止構造を適用した。バックヨークとボビンの間への油および異物の侵入を防ぐことで、センサの検出性能の低下を防止する。

開発品の耐油性及び耐コンタミ性を確認するため、異物を含むATFやMTFを軸心まで満たしたボックス環境にて、油温120℃、4 000 min⁻¹回転の条件で1 000時間を超える評価を実施し、試験前後でセンサ性能に差が生じないことを確認した。

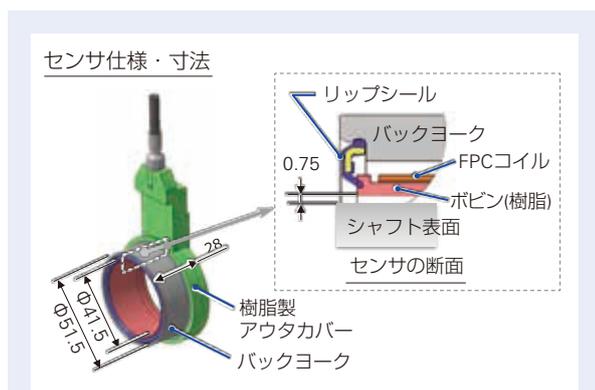


図4 開発したセンサヘッド
Fig. 4 Structure of sensor head

3.2 シャフトの開発

2.2節、2.3節で述べたように、本トルクセンサシステムにおけるセンサの感度、およびトルクに対するヒステリシス誤差は、シャフトの磁歪特性の影響を受ける。この特性は、シャフトの材料となる鋼種や、熱処理、表面処理により変化することが知られている²⁾。

図5は、シャフトの鋼種や工法と、センサ出力の感度およびヒステリシス誤差との関係を示したものである。ヒステリシス誤差に注目すると、炭素鋼に高周波焼入れを施したシャフトに対し、浸炭焼入れを施したSCr材とSCM材は、大幅にヒステリシス誤差を低減できていることが分かる。また、センサの感度の向上という観点では、シャフトへのショットピーニング加工や、Ni含有率の高い鋼種の選定が有効であることが読み取れる。シャフト表面にショットピーニング処理を施すことで、非磁性のオーステナイトが強磁性のマルテンサイトに変態しており、これが感度向上の要因の一つと言われている¹⁾。また、鋼種がNi合金鋼である場合は更なる感度向上が図れる。ショットピーニングを施したシャフト(SCr420H + SP, SCM420H + SP)は、未処理のシャフト(SCr420H, SCM420H)に対し、約4倍の感度が得られた。また、SNCM420H (Ni = 1.55 ~ 2.0%)とSNC815 (Ni = 3.0 ~ 3.5%)を用いたシャフトでは、SCr420H (Ni ≤ 0.25%)を用いたシャフトに対し、それぞれ約1.5倍、1.8倍の感度が得られた。

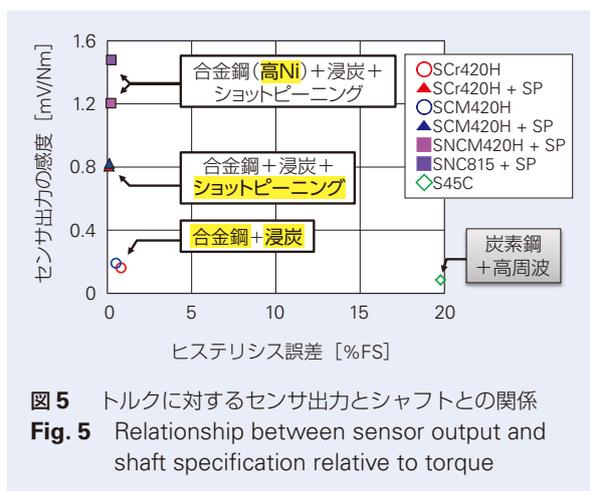


図5 トルクに対するセンサ出力とシャフトとの関係
Fig. 5 Relationship between sensor output and shaft specification relative to torque

さらに、シャフトの形状が感度に及ぼす影響について評価した結果を表 1 に示す。外径 $\phi 40$ mm の中実シャフトと、同じ外径で内径 $\phi 37$ mm の中空シャフトとを比べると、中空シャフトでは約 4.1 倍に感度が向上した。この時、トルクに対する発生応力の比は約 3.7 倍であり、本センサを用いたシステムの感度設計には、シャフトに発生する応力にも配慮する必要が示唆される。

また、2.3 節で述べた通り、シャフト周方向の透磁率の不均一は、回転時に生じる誤差の要因となる。図 6 に示したように、シャフトの製造過程において、周方向の品質を均一にすることが、回転時に生じる誤差の低減には有効である。

表 1 シャフトに発生する応力とセンサ感度との関係

Table 1 Stress on shaft and sensor sensitivity

	1 Nmあたりの発生応力[MPa/Nm] (計算値)	入力トルクに対するセンサ出力の感度[mV/Nm] (実測値)
中実シャフト 	0.08	0.66
中空シャフト 	0.30	2.72
中空 / 中実の比率	3.7倍	4.1倍

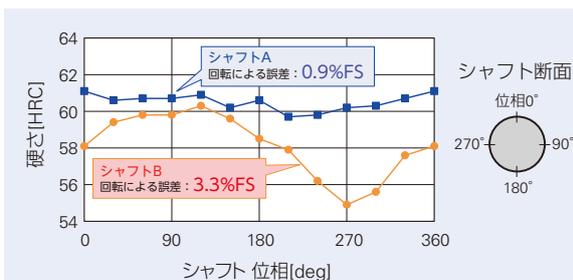


図 6 シャフトの全周の硬さと回転による誤差

Fig. 6 Error from rotation and hardness around shaft

3.3 演算器の開発

図 7 に、開発した演算器を示す。演算器は外部から電源供給を受け起動する。電源電圧は、自動車の実機環境を考慮して 12 V を定格とした。

演算器はセンサヘッドを交流励磁し、センサヘッドからの信号は演算器が受信、トルク信号へ変換される。このとき演算器は、センサヘッドの電流量に基づく信号をモニターして温度推定を同時に行い、トルク信号を温度補償する。このようにして得られたトルク信号は、アナログ電圧または CAN 信号に変換され、外部に出力される。

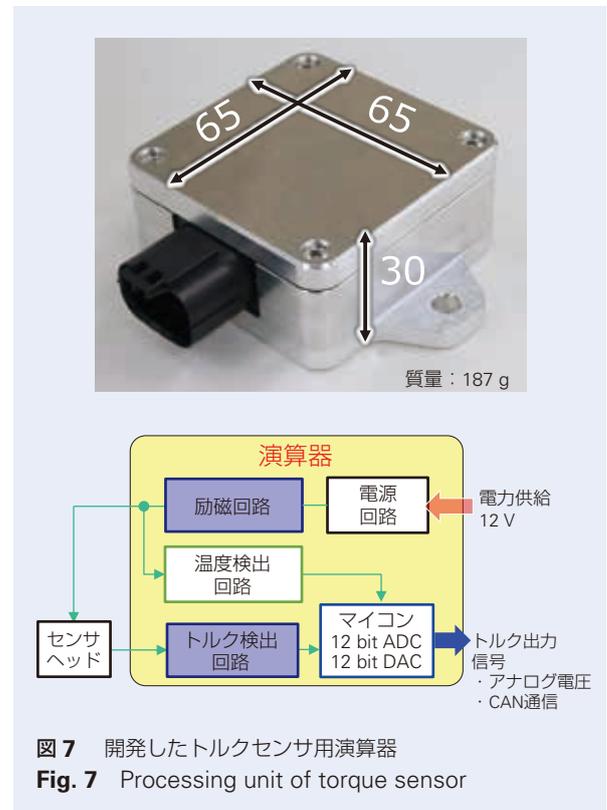


図 7 開発したトルクセンサ用演算器

Fig. 7 Processing unit of torque sensor

4. トルクセンサシステムの検証

3章までに述べたセンサヘッド、シャフト、演算器を組合せ、システムとしてのトルク測定性能の検証を行った。シャフトは、直径φ40（中実）のSCr420Hに浸炭焼入れ焼戻しを行い、トルク計測面に研磨およびショットピーニングを施したものを用意した。シャフトに±1 000 Nmのトルクを負荷し、-30℃、20℃、150℃の各温度で、磁歪式トルクセンサの出力を確認した。出力特性を図8に示す。開発したシステムは、入力トルクに対して高い線形性を有しており(図8(1))、さらに、演算器の持つ温度補償機能により、実車使用環境として想定される温度範囲において、誤差の少ない出力が得られる(図8(2))ことも確認された。

これらの測定結果から得られた出力特性の総合精度を図9に示す。本トルクセンサシステムでは、2.4節で目標と定めた5%を下回る、約4.0%の総合精度を確認することができた。

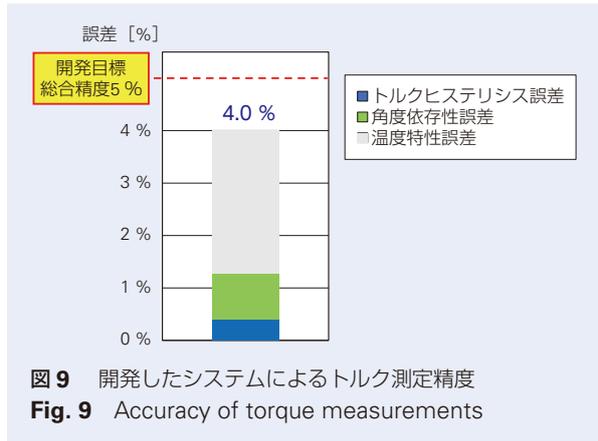


図9 開発したシステムによるトルク測定精度
Fig. 9 Accuracy of torque measurements

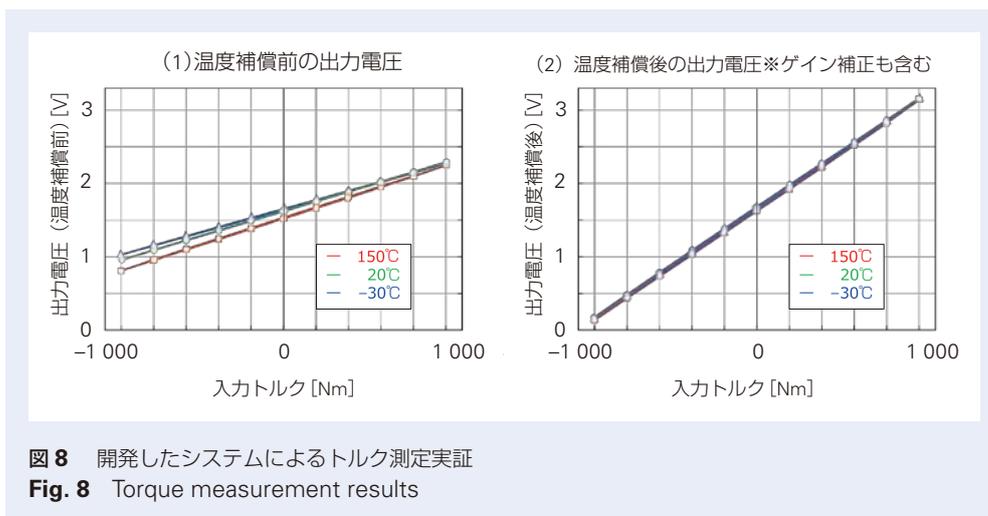


図8 開発したシステムによるトルク測定実証
Fig. 8 Torque measurement results

5. あとがき

本稿では、自動車用パワートレイン向けに実機実装可能な磁歪式トルクセンサシステムを開発し、その出力特性について実証を行った。その結果、本トルクセンサシステムは、入力トルクに対し高い線形性を有しており、演算器による温度補償を施すことで、環境温度に左右されない出力が得られることを確認した。さらに、 $\pm 1\,000\text{ Nm}$ のトルク範囲にて、約4.0%の総合精度を確認できた。

現在、油中環境での耐久性を含む、各種信頼性評価を実施しており、今後は、多様なアプリケーションに対応できるよう、センサヘッドのサイズを拡充していく。

参考文献

- 1) 中村晃之, 杉山雄太, 清水悠輝, “車載トランスミッション用磁歪式トルクセンサー”, 日立金属技報, vol. 35 (2019) 18-23.
- 2) 福田晃大, 小野潤司, 宮崎知之, 岡田伸治, “磁歪式トルクセンサのEVへの適用提案 – タービンシャフトのリアルタイムトルク計測 –”, 自動車技術会 2019 年春季大会学術講演予稿集, 20195291 (2019) 1-6.

生理特性を用いたオフセンタ領域における 操舵感の評価

三宅 正樹*, 神邊 篤史**, 鈴木 桂輔***, 西尾 誠人



三宅 正樹



神邊 篤史

Evaluation of Steering Feel in the Off-Center Range Using Physiological Characteristics

M. Miyake, A. Kanbe, K. Suzuki, M. Nishio



鈴木 桂輔

公益社団法人 自動車技術会の転載承認を得て、自動車技術会論文集 Vol.53 No.2 (2022 年)から転載

The purpose of this study is to construct the quantitative evaluation method of steering feel based on the sensitivity evaluation. In this study, we conducted experiments simulating and evaluating steering reaction torque characteristics in the off-center range by a driving simulator. We performed principal component analysis of sensitivity evaluation values and analyzed correlations with physiological indices. The results showed the strong correlation between electrocardiogram LF/HF and LF/(LF+HF), which are sympathetic nerve activity index, and comfort, which shows the possibilities of more concentrated driving with favorite reaction torque characteristic.

1. まえがき
 2. 生理特性を用いた操舵感評価方法
 - 2.1 本研究における操舵感
 - 2.2 感性評価
 - 2.3 生理評価
 3. 実験環境
 - 3.1 ドライビングシミュレータ(DS)
 - 3.2 走行コース
 - 3.3 反力特性
 - 3.4 実験方法
 4. 実験結果
 - 4.1 感性評価の主成分分析結果
 - 4.2 基本感情と生理指標の相関分析結果
 - 4.3 反力特性の違いが生理特性に与える影響
 5. ドライバ特性の分析
 - 5.1 運転行動によるドライバ特性の分析
 - 5.2 感性評価によるドライバ特性の分析
 6. まとめ
 7. 今後の予定
- 謝辞

1. まえがき

自動車メーカーでは、安心・安全に加えて、運転の楽しさや快適さといった感性性能を重要視している。ドライバは操舵反力と車両挙動から操舵感を感じており¹⁾、操舵感ドライバ感情に影響を及ぼすと考えられる。このため、ドライバの感情を満足させるために、操舵感の設計指針が必要とされている²⁾。しかしながら、操舵感とドライバ感情の関係を定量的に分析した研究

例は極めて少なく、自動車メーカーではテストドライバの官能評価によって操舵感を作り込んでいるのが現状である。操舵反力と車両挙動のうち、車両挙動は車両諸元に依存するため変更は容易ではないが、操舵反力はEPS(電動パワーステアリング)によって比較的自由に設計できる。さらに近年はステアバイワイヤシステムによって操舵反力の設計自由度が向上しており、

* 技術開発本部, 新領域商品開発センター, 技術開発第一部

** 愛知工科大学, 工学部, 情報メディア学科

*** 香川大学, 創造工学部

自動車の感性性能を効率的に向上するには、ドライバ感情に合わせて操舵反力を設計することが有効だと考えられる。

ドライバ感情の評価に関する先行研究では、運転の楽しさを評価した研究がある³⁾。この評価方法は操舵感に対するポジティブな感情の評価として有効だが、ネガティブな感情を含む総合的なドライバ感情を評価したものではない。また、官能評価では同じ心理状態であっても、評価語に対する認識の違いから生理状態が異なる可能性がある。そのため、心理状態の妥当性を脳波や心拍などの生理特性で客観的に確認することが望ましい⁴⁾。

一方で、生理特性を用いた操舵感に関する先行研究では、運転中の筋電位から肉体的負担、自律神経活動から心理的負担を評価した研究^{5) 6) 7)}があるが、運転のしやすさや負担に関する研究に留まっており、操舵反力とドライバの楽しさや快適感といった感情との関係性は明らかにされていない。

このような背景のもと、筆者らは運転の楽しさや快適さを向上できる操舵感の実現を目指して、操舵反力に対するドライバ感情の定量評価手法の構築に取り組んできた。筆者らは先行研究⁸⁾において、操舵反力に対するドライバ感情を感性評価と心拍由来の生理特性を用いて評価できる可能性を示したが、反力特性に対する不快感が強い評価環境であったため、楽しさや快適感の評価には至っていない。また、感性評価語が抽象的なため、操舵反力の設計指針に活用できていない。そこで、本研究では以下の三つを目的として取り組んだ。一つ目は、操舵感に対する楽しさや快適感といった多様なドライバ感情を、感性評価により総合的に評

価することである。二つ目は、感性評価結果の妥当性を生理特性で客観的に裏付けることである。三つ目は、生理特性で裏付けた感性評価結果から、ドライバ特性(操舵感に対する好みなど)を抽出し、操舵感の設計指針に活用できることを明らかにすることである。

2. 生理特性を用いた操舵感評価手法

2.1 本研究における操舵感

本研究では、ドライバが操舵を行った際に操舵反力と車両応答を通じて感じる感情を操舵感と定義した。また、ドライバの操舵を、直進状態を維持する受動的な操舵とカーブ走行時の能動的な操舵に分けて、操舵角度域の違いから、それぞれをオンセンタ領域、オフセンタ領域と定義した。ドライバはオフセンタ領域において、**図1**に示すように①目標操舵角への切り込み操舵、②保舵、③修正舵、④戻し操舵などの複合的かつ能動的な操舵を行うことから、多様な感情を誘起できると考え、本研究ではオフセンタ領域の操舵感を評価した。

2.2 感性評価

先行研究において、基本感情を覚醒感と快・不快で評価する手法が報告されている⁹⁾。本研究では、操舵感に対するドライバ感情の評価に、先行研究⁸⁾で仮定した基本感情モデルを用いた(**図2**)。基本感情モデルを用いることで、快・不快と覚醒度を基準に、興奮、楽しさ、退屈、イライラなど、ドライバの感情を総合的に評価できる。

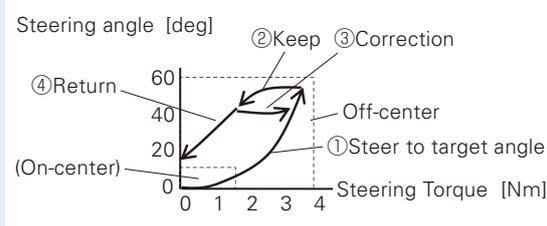


図1 オフセンタ領域におけるドライバの操舵行動
Fig. 1 Driver's steering actions in the Off-center area

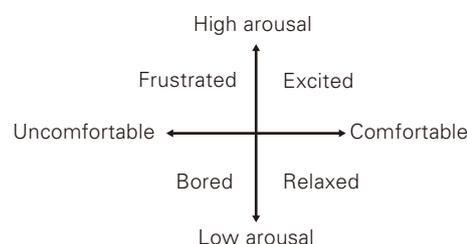


図2 基本感情モデル⁸⁾
Fig. 2 Basic emotion model⁸⁾

本研究では、基本感情モデルと操舵感に関する感性評価語による7段階のSD (Semantic Differential) 法を用いてドライバ感情を評価した。感性評価語は、基本感情を表す評価語(8語)、基本感情を補足的に説明する抽象的な評価語(16語)、操舵感の設計指針と

するために選定した力覚的な評価語(12語)の計36語を使用した(表1)。抽象的な評価語は先行研究(8)から意味が曖昧なものを除外して抜粋した。力覚的な評価語は自動車の操舵システムの評価で用いる評価語からオフセンタ領域に関する評価語を選定した。

表1 感性評価語

Table 1 Sensitivity evaluation words

Basic emotion	Abstract Evaluation words	Force-based Evaluation Words
Comfortable (心地よい)	<ul style="list-style-type: none"> ・ Controllable (操作しやすい) ・ Frisky (軽快な) ・ Luxury (上質な) ・ Cheep (安っぽい) 	<ul style="list-style-type: none"> ・ Good Sense of unity with vehicle (車両との一体感がある) ・ Increase rate of steering torque is linear (操舵トルクのリニア感がある) ・ Easy to estimate vehicle's behavior (車両挙動が予測しやすい) ・ Lumpy (ゴツゴツした)
Uncomfortable (不快な)		
Awake (目の覚めるような)	<ul style="list-style-type: none"> ・ Active (活動的な) ・ Stretchy (伸びやかな) ・ Cleared (すっきりした) ・ Strong (力強い) 	<ul style="list-style-type: none"> ・ Steering torque of on-center is heavy/light (切り始めが重い/軽い) ・ Steering retaining torque is heavy/light (保舵が重い/軽い)
Sleepy (眠くなる)		
Excited (わくわくする)	<ul style="list-style-type: none"> ・ Attractive (魅力的な) ・ Sporty (スポーティな) ・ Exactly (思いどおりの) ・ Monotony (単調な) 	<ul style="list-style-type: none"> ・ Good vehicle reaction (車両応答が良い) ・ Quick vehicle reaction (車両応答が早い)
Bored (退屈な)		
Relaxed (落ち着いた)	<ul style="list-style-type: none"> ・ Regulated (整った) ・ Steady (安定した) ・ Smooth (滑らかな) ・ Delicate (デリケートな) 	<ul style="list-style-type: none"> ・ Return easily (戻しやすい) ・ Return quickly (戻りが早い) ・ Smooth counter steering (切り返しがスムーズな) ・ Steering retaining easily (保舵し易い)
Frustrated (イライラする)		

2.3 生理指標

2.3.1 心拍由来の生理指標

操舵感に対する快・不快の評価には、先行研究⁹⁾と同じ自律神経系の指標を用いた。心拍のR-R間隔から交感神経指標（集中・ストレス）と副交感神経指標（リラックス）に関する生理指標を算出し、表2に示す計6種類の自律神経系指標を用いた。なお、CSIとCVIは先行研究¹⁰⁾で提唱された指標であり、R-R間隔の時系列データに対してローレンツプロット解析を行うことで算出される。

2.3.2 脳波由来の生理指標

操舵感に対する覚醒状態の評価には、先行研究⁹⁾と同じ中枢神経系の生理指標を用いた。計測した脳波データから、高速フーリエ変換(FFT)で1 Hzごとのパワースペクトル積分値を算出し、 θ 波(4 Hz以上8 Hz未満)、 α 波(8 Hz以上13 Hz未満)、 β 波(13 Hz以上30 Hz以下)を生理指標とした。

3. 実験環境

3.1 ドライビングシミュレータ(DS)

Elsaco社製の動揺装置とMige社製の反力装置(90ST-AM04025)を、三咲デザイン製シミュレー

ションソフトDS-nanoで独自に組み合わせたDSを用いた。DSにはステアリングシステムモデル¹⁾⁸⁾を搭載し、反力特性を任意に変更可能とした。車両挙動はCarSimを用いて計算し、車両モデルはDセグメントのセダンタイプ⁸⁾を使用した。

実験中はDS-nanoを介して3台の液晶モニタとモーション装置から実験参加者に走行映像と動揺を提示した。動揺中に周辺環境が視界に入ると実験参加者がシミュレータ酔いを起こす可能性があるため、実験室の照明は消灯した。また、運転に対する没入感を向上させるために、実験中はDSに付属したセダン車の走行音を流した。

3.2 走行コース

走行コースを図3に示す。実験参加者がオフセンタ領域の能動的な操舵を行えるように直線と5個のS字カーブを繰り返す周回コースを作成した。コース全長は7 kmである。実験参加者にステアリング操作に集中してもらうために車速は60 km/hで固定し、道路中央の黄色の実線に沿って走行するよう教示した。各カーブの曲率半径Rは、ステアリングホイールにおける最大操舵角が60度となるように $R = 60$ mとした。また、直線とカーブの接続部分で急激なステアリング操作をさせないように緩和区間を設けた。

表2 自律神経系の生理指標

Table 2 Physiological indices of autonomic nervous system

Physiological indices	Neural activity
CVR-R	Parasympathetic nerve activity (Relax)
HF	
LF/HF	Sympathetic nerve activity (Concentrate/Stress)
LF/(LF+HF)	
CSI	
CVI	Parasympathetic nerve activity

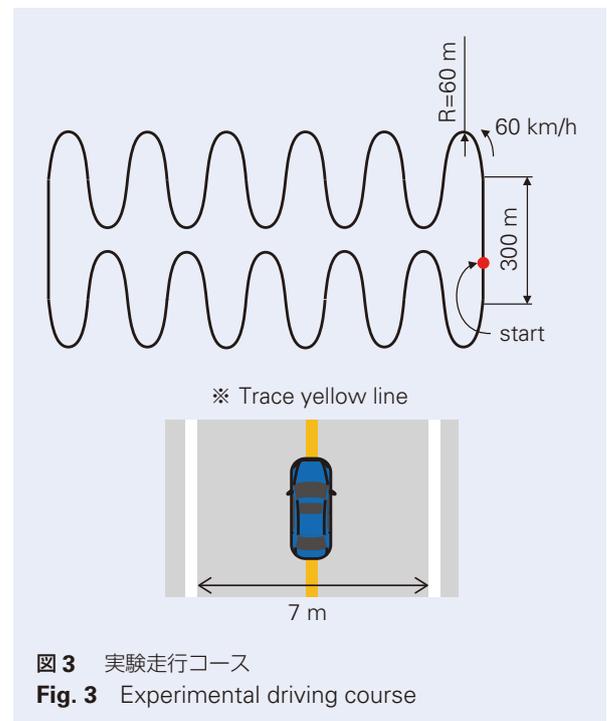


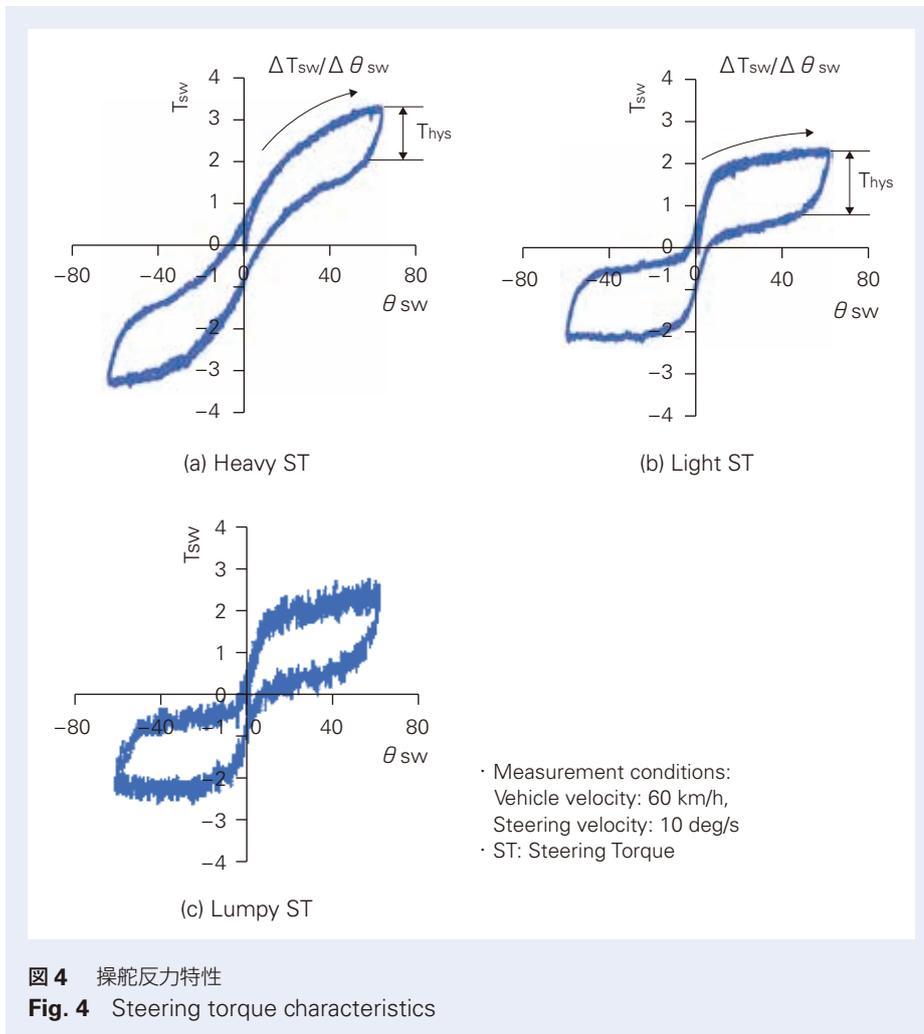
図3 実験走行コース
Fig. 3 Experimental driving course

3.3 反力特性

オフセンタ領域の操舵において、切り込み操舵では操舵角度 (θ_{sw}) に対する操舵トルク (T_{sw}) の変化勾配 ($\Delta T_{sw} / \Delta \theta_{sw}$) が大きいほど手応えが重くなる。また、保舵と修正舵では操舵トルクの変化勾配 ($\Delta T_{sw} / \Delta \theta_{sw}$) とヒステリシス (T_{hys}) が適度にあると運転負担が低減する。本研究では、操舵角度に対する操舵トルク変化の勾配とヒステリシスが異なる3種類の反力特性を設定した。設定した反力特性を図4に示す。

図4 (a)の反力特性は、他の反力特性に比べて操舵トルク変化勾配 ($\Delta T_{sw} / \Delta \theta_{sw}$) を大きくすることで、操舵トルクが重めの特性とした (以降、図4 (a)を重め特性と呼ぶ)。図4 (b)の反力特性は、重め特

性よりも切り込み時の操舵トルク変化勾配 ($\Delta T_{sw} / \Delta \theta_{sw}$) を小さくすることで、ドライバがより少ない運転負担で車両をコントロールできる特性とした (以降、図4 (b)を軽め特性と呼ぶ)。軽め特性は重め特性よりヒステリシス T_{hys} を大きくして、保舵と修正舵の運転負担も低減した。なお、重め特性と軽め特性には、運転に対する没入感を向上するために、路面振動に相当する操舵トルク振動を付与した¹¹⁾。図4 (c)の反力特性は、軽め特性を基に、悪路走行を模擬したステアリングホイール振動を付与することで、ゴツゴツとした引っ掛かりのある、意図的に操舵し難くした特性である (以降、図4 (c)をゴツゴツした特性と呼ぶ)。



3.4 実験方法

3.4.1 実験参加者

実験参加者は、普通自動車運転免許を保有している男性 16 名(平均年齢：35.6 歳，標準偏差：13.5)である。実験参加者の内，9 名は自動車の操舵システムの開発に携わる評価ドライバ(平均年齢：45.2 歳，標準偏差：10.5)，7 名は日常的に自動車を運転している一般ドライバ(学生，平均年齢：23.1 歳，標準偏差：1.12)，人数比は 6：4 である。実験参加者には香川大学創造工学部研究倫理委員会で審議・承認されたインフォームドコンセントを実施した。

3.4.2 走行方法

3 種類の反力特性に対して，感性評価主体の走行と，生理特性計測主体の走行を実施した。感性評価主体の走行では，実験参加者に操舵感の差に集中してもらうため生理特性は計測せず，走行時間を無制限とした。3 種類の反力特性の走行順はランダムとし，学習効果による影響を除外するため本番走行(時間無制限)前に練習走行(3 分間)を実施し，本番走行後に感性評価(15 分，休憩含む)を実施した。一方で，生理特性評価主体の走行では，本番走行前に生理特性を安定させてデータ解析の基準とするために，感性評価主体の走行に対して，走行練習と本番走行の間に閉眼安静(5 分間)を追加し，本番走行時間は 10 分間とした。

3.4.3 生理特性の計測方法

心拍 R-R 間隔の計測には，先行研究⁸⁾と同じユニオンツール株式会社製の心拍センサ myBeat WHS-1 とディスプレイタイプの銀塩化銀電極である Ambu 社製 SP-00-S を用いた。測定箇所は左胸部とした。

脳波の計測には，先行研究⁸⁾と同じ TAOS 研究所製の脳波・脈波同時測定装置 DualMind VBPG-01 を用いた。装置を前頭部に装着し，脳波計測部位の国際基準である国際 10-20 法で定められた Fp1 および Fp2 における脳波を計測した。

4. 実験結果

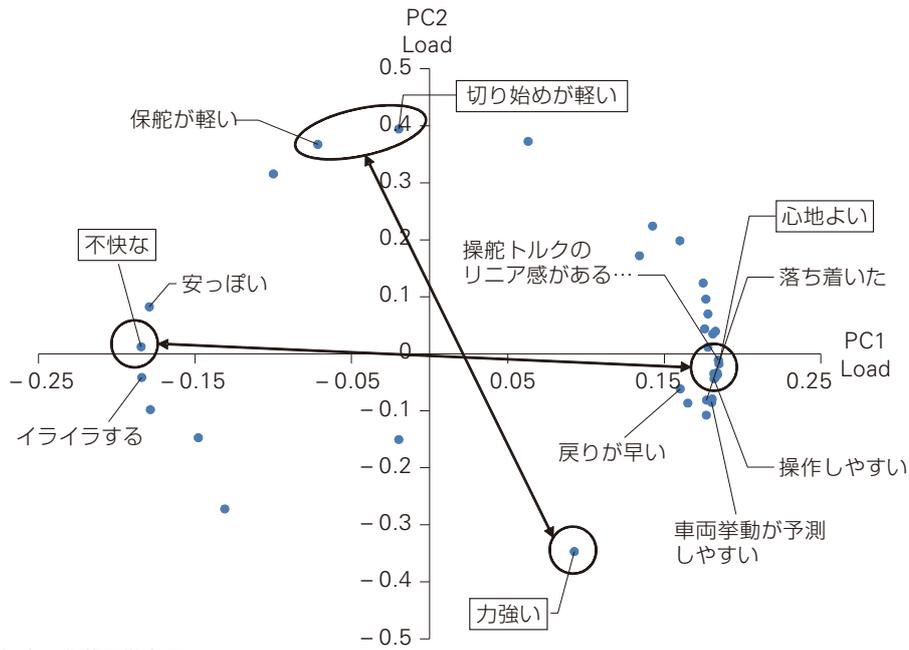
4.1 感性評価の主成分分析結果

実験参加者 16 名の感性評価結果に対して主成分分析を行った結果，重めと軽めの特性を好むドライバ群に分かれたため，群ごとに主成分分析を行った。軽めを好む群(9 名)と重めを好む群(7 名)の主成分分析結果を図 5，図 6 に示す。図 5 (a)，図 6 (a)に示す主成分負荷散布図より，第 1 主成分(PC1)と第 2 主成分(PC2)に相当する評価語を確認した結果，両群ともに PC1 は「快・不快」，PC2 は「重い・軽い」であった。なお，重めと軽めの特性に対する好みは，「快・不快」を表す PC1 得点により分類した。全実験参加者の PC1 得点を図 7 に示す。各群における評価ドライバと一般ドライバの人数比は 6：4 であり，実験参加者 16 名における人数比と同等であった。

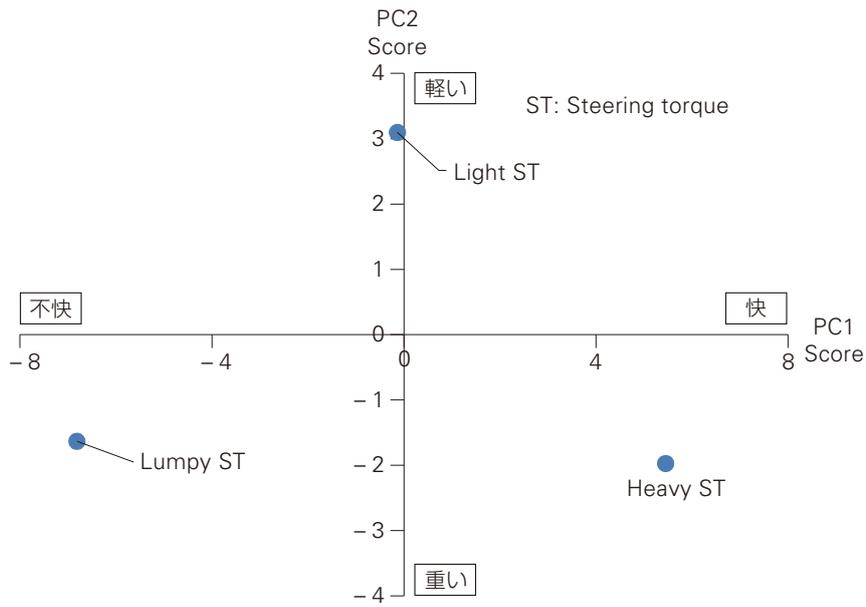
また，表 3 に示す固有値表より，オフセンタ領域の操舵感は「快・不快」と「重い・軽い」で 90 %以上評価できることを確認した。さらに，図 5 (b)，図 6 (b)に示す主成分得点散布図より，全実験参加者が 3 種類の反力特性を明確に区別できていることを確認した。

4.2 基本感情と生理指標の相関分析結果

実験参加者 16 名より，サンプル数 16 の t 分布において 1 %水準(片側検定)を満足する t 値(2.264)を満足するように，相関係数 $|R|$ の閾値を $|R| > 0.6$ とした。実験参加者 16 名の感性評価結果と生理指標の相関関係を確認したところ，相関係数 $|R| > 0.6$ の相関は確認できなかったため，評価ドライバと一般ドライバに分けて，各群に対して相関分析を実施した。評価ドライバの基本感情と，心拍由来の交感神経指標である LF/HF と LF/(LF + HF) の相関分析の結果を表 4 に示す。表 4 より，「A：心地よい」「B：不快な」と「G：落ち着いた」に対して，相関係数 $|R| > 0.6$ の相関を確認した。以上より，評価ドライバについては，操舵感に対するドライバの基本感情のうち「快・不快」と「落ち着いた」を，感性評価および生理特性を用いて定量的に評価することができたと考える。なお，一般ドライバならびに，脳波由来の生理指標においては，相関係数 $|R| > 0.6$ の相関を確認できなかった。



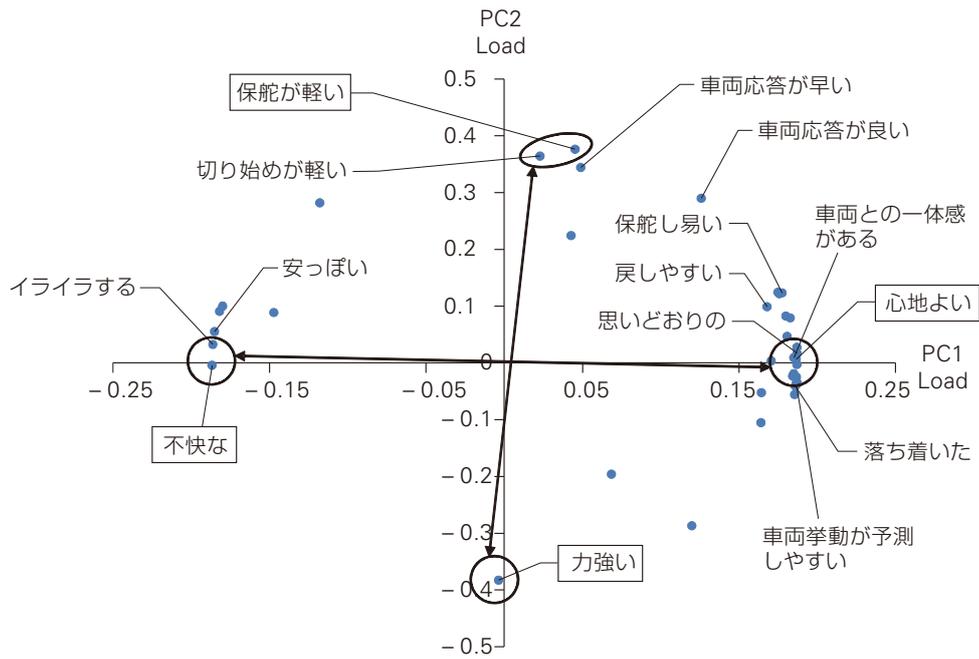
(a) 主成分負荷量散布図
(a) Scatter plot of principal component loads



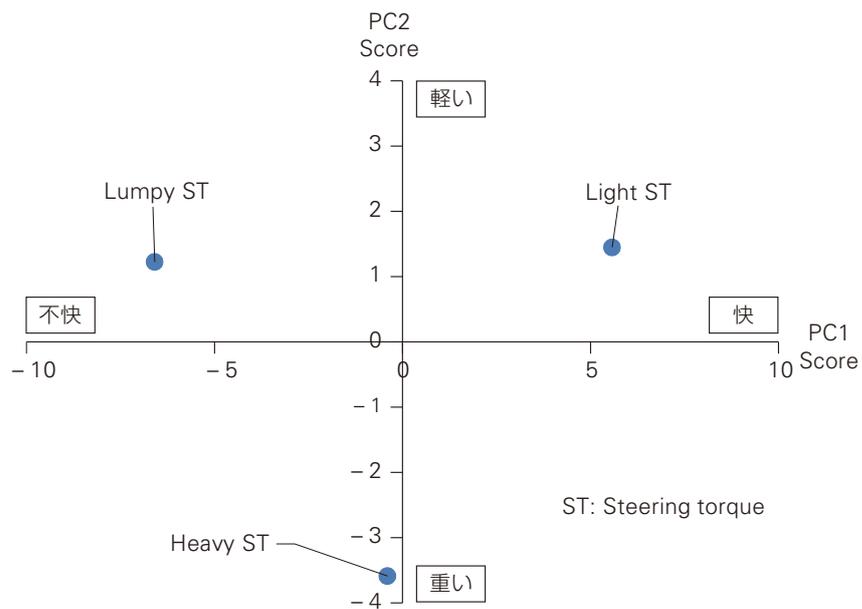
(b) 主成分得点散布図
(b) Scatter plot of principal component scores

図5 主成分分析(重めを好むドライバー群)

Fig. 5 Principal component analysis (Drivers prefer heavy ST)



(a) 主成分負荷量散布図
(a) Scatter plot of principal component loads



(b) 主成分得点散布図
(b) Scatter plot of principal component scores

図6 主成分分析(軽めを好むドライバー群)
Fig. 6 Principal component analysis (Drivers prefer light ST)

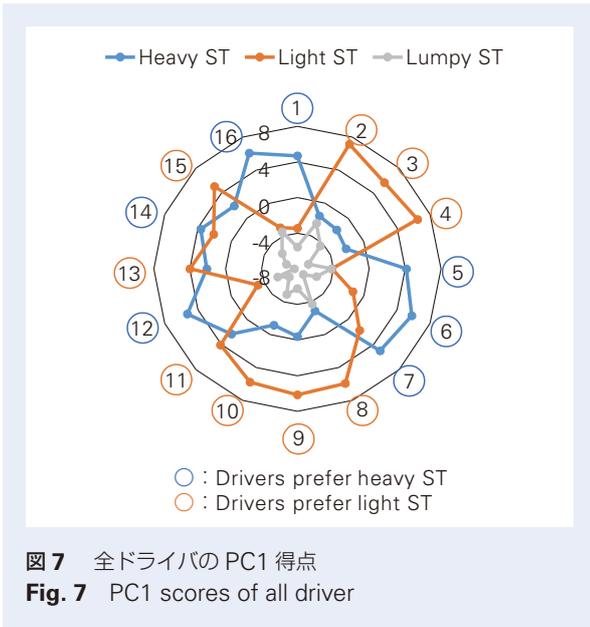


表3 寄与率表

Table 3 Eigenvalue list

	Drivers prefer heavy ST		Drivers prefer light ST	
	PC1	PC2	PC1	PC2
Eigenvalue	28.3	6.5	29.1	6.2
Contribution rate (%)	74.4	17.0	76.7	16.3
Cumulative contribution rate (%)	74.4	91.4	76.7	93.0

表4 相関分析結果(評価ドライバのみ)

Table 4 Correlation analysis result (Only evaluation drivers)

Basic emotion		A	B	C	D
LF/HF	R	0.700	-0.783	-0.043	-0.153
	P value	< .001	< .001	0.831	0.445
LF/(LF+HF)	R	0.632	-0.738	-0.025	-0.243
	P value	< .001	< .001	0.903	0.223
Basic emotion		E	F	G	H
LF/HF	R	0.288	-0.152	0.783	-0.442
	P value	0.145	0.450	< .001	0.021
LF/(LF+HF)	R	0.307	-0.082	0.714	-0.411
	P value	0.120	0.686	< .001	0.033

A : 心地よい, B : 不快な, C : 目の覚めるような, D : 眠くなる, E : わくわくする, F : 退屈な, G : 落ち着いた, H : イライラする

4.3 反力特性の違いが生理特性に与える影響

好みの反力特性がドライバの生理特性に与える影響を確認するために、重めと軽めを好む群それぞれに対して、「快・不快」と相関を確認した交感神経指標のうち、相関係数が高い指標を用いて3種類の反力特性に対して分散分析を行った。

重め特性を好む群には $LF/(LF + HF)$ ($R = 0.59, p = 0.005$) を用いた。まず等分散性の検定を行った結果、 $p < .05$ となり、等分散を仮定できなかった。そのため、Welch 法による分散分析を行った結果、有意差を確認した ($F(2, 9.84) = 33.209, p < .001$)。そこで、Games-Howell 法による多重比較を行った結果、**図8**に示すように有意差 ($p < .001$) を確認した。

軽め特性を好む群には CSI ($R = 0.49, p = 0.009$) を用いた。まず等分散性の検定を行った結果、 $p \geq .05$ となり、等分散を仮定できたため一元配置分散分析を行った結果、有意差を確認した ($F(2, 24) = 6.045, p = .007$)。そこで、Tukey 法による多重比較を行った結果、**図9**に示すように有意差 ($p = .012$) を確認した。以上より、好みの反力特性においてドライバの交感神経指標が有意に大きいことを確認した。交感神経指標は**表2**に示すように集中とストレスを表す指標だが、**表4**に示すように交感神経指標である $LF/(LF + HF)$ は「G：落ち着いた」とも相関関係が確認できているため、ドライバは好みの反力特性において、集中して運転できていたと考えられる。

なお、軽めを好む群で $LF/LF + HF$ と「快・不快」との間に相関関係を確認できなかった要因として、呼吸リズムの影響が考えられる。呼吸が速くなると、みかけ上 LF 成分が減少して HF 成分が増加する¹²⁾。一方、 CSI はローレンツプロット解析で外れ値を除外できる¹⁰⁾ ため、呼吸リズムの変動の影響を受けにくいと考えられる。また、本研究では運転に対する没入感を向上したことで、実車に近い緊張感を感じやすい実験環境であったと考えられる。以上より、軽めを好む群は緊張により呼吸リズムが速くなった結果、 CSI が適用された可能性があると考えられる。

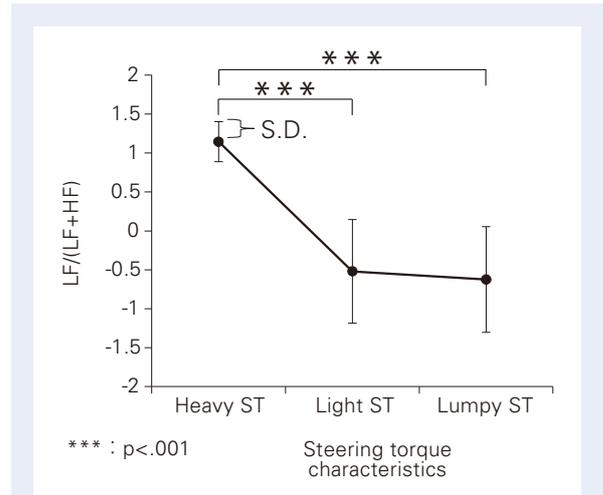


図8 生理指標における操舵トルク特性の影響(重めを好むドライバ群)

Fig. 8 Effect of steering torque characteristics on physiological indices (Drivers prefer heavy ST)

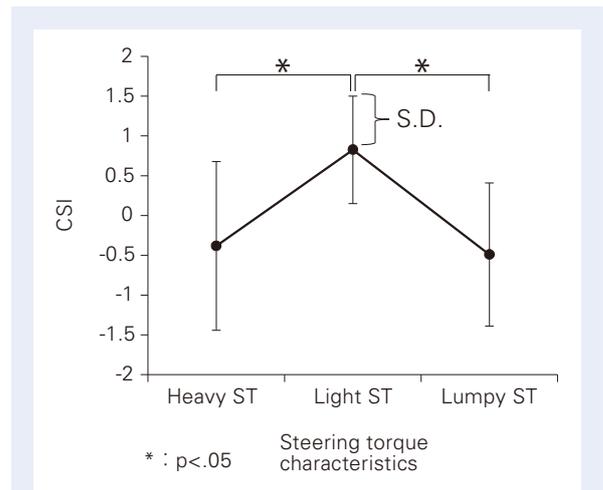


図9 生理指標における操舵トルク特性の影響(軽めを好むドライバ群)

Fig. 9 Effect of steering torque characteristics on physiological indices (Drivers prefer light ST)

5. ドライバ特性の分析

前章にて実験参加者を、評価ドライバーと一般ドライバー、重め・軽め特性を好むドライバー群に分けることで、基本感情と感性評価結果との相関関係と、操舵反力が生理特性に与える影響を確認した。しかしドライバーを分類する具体的な要因（各群のドライバーに共通する特性）は明らかでない。本章では、運転行動と感性評価結果よりドライバー特性を分析した。

5.1 運転行動によるドライバー特性の分析

図3に示すコース中盤のS字カーブ5個の操舵速度データから、ステアリングエントロピー法¹³⁾(SE)を用いて操舵の滑らかさを示すSE値を算出し、実験参加者ごとで比較した。なお、図4(c)のゴツゴツした特性は意図的に操舵し難く設定しておりSE値が大きいことが明らかのため、分析対象から除外した。ウォード法によるクラスタ分析を行った結果、図10に示すように3群に分類された。また、図11に示すように、SE値は群A、群B、群Cの順に小さく、SE値が小さい群には評価ドライバーが多く含まれた。

そこで評価ドライバーと一般ドライバーのSE値についてt検定を行った結果、図12に示すように評価ドライバーは一般ドライバーに対して、SE値が有意に小さいことを確認した($t(14) = -3.125, p < .01$)。この結果から、評価ドライバーに限らず滑らかな操舵を行うドライバーほど操舵反力の力覚的な刺激の変化に敏感で、生理特性に影響が出やすい可能性がある。このように考えると、4.2節において感性評価結果と生理特性の相関関係が、一般ドライバーでは確認できなかった要因の一つであったと考えることができる。

5.2 感性評価によるドライバー特性の分析

表1に示す操舵感に関する力覚的な評価語(12個)に、抽象的な評価語の中から力覚的刺激に関する評価語である「e:力強い」「j:デリケートな」を加えた14個の感性評価値について、重め・軽め特性を好むドライバー群で比較した。

評価語ごとの平均値を算出し、各群の平均値の差(重めを好む群-軽めを好む群)を算出した結果を図13に示す。図13の点数が正の場合は重めを好む群の感性評価値が高く、負の場合は軽めを好む群の感性評価値が高いことを示す。

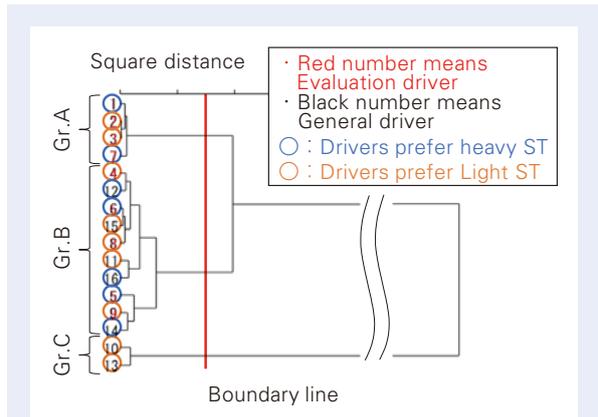


図10 全ドライバーのクラスター分析結果
Fig. 10 Cluster analysis result of all driver

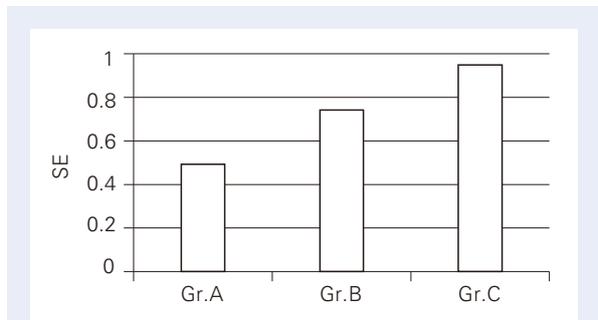


図11 各群のSE値
Fig. 11 SE value of each group

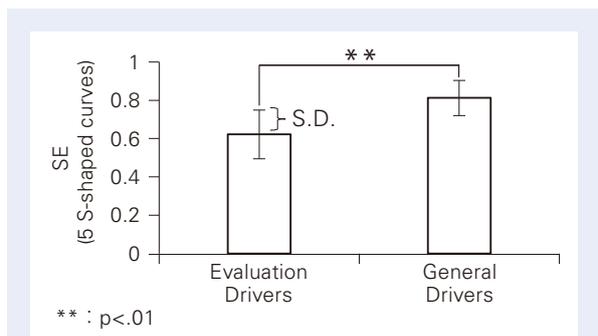


図12 SE算出結果
Fig. 12 Calculation result of SE

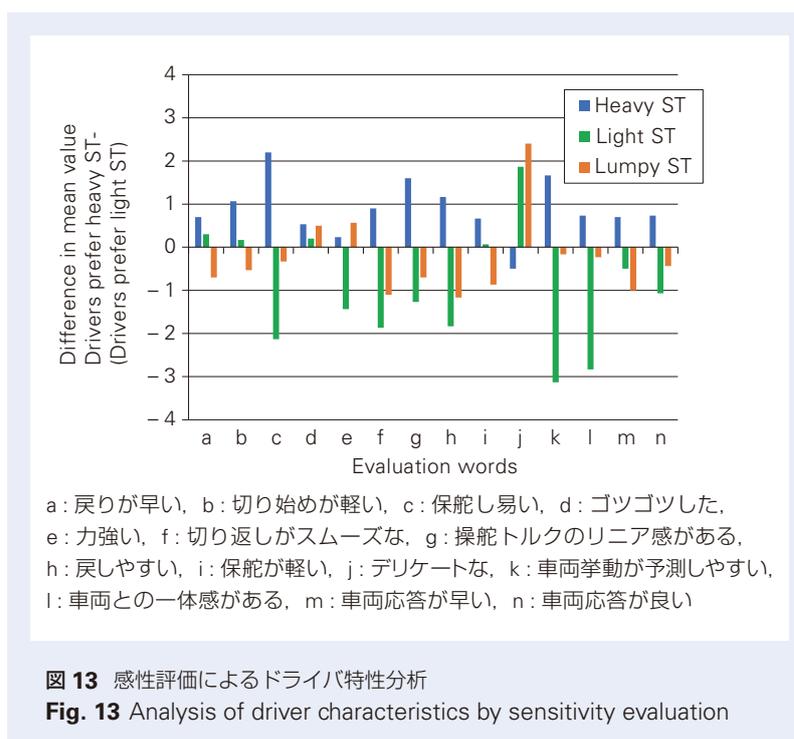


図 13 に示すように、軽めを好む群は、好みの反力において車両応答に関する感性評価値 (k: 車両挙動が予測しやすい, l: 車両との一体感がある) の差が 2 点以上あり、他の評価語より顕著である。このことから、軽めを好むドライバ群は、車両挙動を含む総合的な操舵感に対する感度が高い可能性がある。一方で、重めを好む群はゴツゴツした反力特性において「j: デリケートな」の差が 2 点以上あり、他の評価語より顕著である。このことから、重い特性を好むドライバ群は、操舵反力の力覚的な刺激に対する感度が高い可能性がある。以上より、感性評価結果を基に、ドライバが好む操舵感の設計指針を示すことができたと考える。

6. まとめ

6.1 操舵感に対するドライバ感情の評価

オフセンタ領域の操舵感に対して、基本感情モデルに基づいた感性評価を行い、ドライバ感情を総合的に評価した。感性評価結果の主成分分析結果より、オフセンタ領域の操舵感を「快・不快」と「重い・軽い」で評価できることを示した。

6.2 生理評価による感性評価結果の裏付け

感性評価結果と生理特性の相関分析より、交感神経指標である LF および LF/(LF + HF) と、「快・不快」

および「落ち着いた」の間に相関関係を確認した。また、ドライバは好みの反力特性において交感神経指標 LF/(LF + HF) または CSI が賦活し、より集中して運転できる可能性を示した。

6.3 ドライバ特性の分析

ドライバの運転行動および感性評価結果から、操舵感に対する好みや感受性を分類することで、ドライバが好む操舵感の設計指針を示すことができたと考える。

7. 今後の予定

本研究では能動的なオフセンタ領域の操舵感に対するドライバ感情を評価したが、受動的なオンセンタ領域を評価できるかは検証が必要である。また、ドライバ特性については明確な分類には至っていない。今後、様々なドライバ特性を把握することで、ドライバの好みに合わせた操舵感の設計を可能にしていく。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、実験およびデータ解析に多大なご協力を頂いた、香川大学鈴木研究室(当時)の宮武宏明氏と、実験環境構築の際に貴重なご意見を頂いた久代育生氏に深く感謝致します。

参考文献

- 1) 山田大介, 久代育生, 村岸裕治, “操舵トルクの特徴が人間-自動車系に及ぼす影響”, 自動車技術会論文集, 44 (2), pp.459-465, 2013.
- 2) Badiru, I, “Customer Focus in EPS Steering Feel Development”, SAE Int. J. Passeng. Cars-Mech. Syst. 7(3), pp.1009-1015, 2014.
- 3) 田中克則, 佐久間壯, 見澤英明, 宮下由佳, “感性工学に基づく Driving Pleasure に関する研究”, 自動車技術会, Vol.47, No05, 2016.
- 4) Sonoko ISHIMARU, “Study on Relationship Between Psychological Condition and Physiological Measurement, and Tactile”, Journal of the Japan Research Association for Textile End-Uses, Vol.47, pp.772-785, 2006.
- 5) Krüger, H., Neukum, A., and Schuller, J., “A Workload Approach to the Evaluation of Vehicle Handling Characteristics”, SAE Technical Paper 2000-02-0170, 2000.
- 6) 三上耕司, 栗谷川幸代, 景山一郎, “生体反応を用いたドライビングプレジャー評価に関する基礎的研究”, 日本機械学会第 14 回交通・物流部門大会講演論文集, No.05-52, pp.291-294, 2005.
- 7) 倉森章, 高口紀貴, 上條正義, 佐渡山亜兵, 清水義雄, “ドライバの力みに着目した自動車の運転しやすさ評価法”, 感性工学研究論文集, Vol.6, No.2, pp.87-92, 2006.
- 8) 神選篤史, 宮武宏明, 鈴木桂輔, “自動車の操舵反力特性の違いによる操舵感の変化の生理・心理学的測定”, 日本感性工学会論文誌, Vol.19, No.1 pp. 73-79, 2019.
- 9) Russell, J.A., “A Circumplex model of affect”, Journal of Personality and Social Psychology, 39(6), pp.1161-1178 (1980)
- 10) 十一元三, 神尾陽子, 村井俊哉, 小久保亮, 稲熊敏広, 扇谷明, “精神分裂病における精神症状に伴う自律神経機能の変化”, 精神医学, Vol.40, No.1, pp.37-42, 1998.
- 11) 久代育生, 山田大介, 澤村浩志, 村岸裕治, 畔柳洋, 小野英一, 小野英一, 富田健仁 “ステアリング振動によるロードインフォメーションと剛性感の評価”, 日本機械学会論文集, Vol.84, No.868, 2018.
- 12) 中川千鶴, “特集③人間工学のための計測手法 第 4 部: 生体電気現象その他の計測と解析 (5) -自律神経系の指標の計測と解析-”, 人間工学, Vol.52, No.1, pp.6-12, 2016.
- 13) Okihiko Nakayama, Tohru Futami, Tomokazu Nakamura, Erwin R. Boer, “Development of a Steering Entropy Method for Evaluating Driver Workload”, SAE Technical Paper 1999-01-0892, 1999.

商品

紹介

トランスミッション用ラビリンスシール付き玉軸受

Ball Bearings with Labyrinth Seal for Transmission Applications

近年、自動車の電動化の加速に伴い、自動車向けトランスミッションは自動車の航続距離延長に向けた技術開発が進められており、より一層の効率向上や小型・軽量化が必要とされている。これに伴いトランスミッションに用いられる軸受についても摩擦損失の低減や小型・軽量化、及び長寿命化がこれまで以上に求められている。マニュアルトランスミッションやデュアルクラッチトランスミッションなど従来型のトランスミッション用軸受の長寿命化アイテムとしては、軸受

の早期破損の原因となる異物の侵入を防止するために接触シールを設けたトランスミッション用密封クリーン玉軸受が小型・軽量化に有効なため使用されているが、シールが接触しているためシールの摺動（しゅうどう）による摩擦損失が問題となっていた。

今回、NSK では自動車の航続距離の延長に寄与出来る摩擦損失低減と長寿命化の両方を実現したトランスミッション用ラビリンスシール付き玉軸受（写真1）を開発したので紹介する。



写真1 トランスミッション用ラビリンスシール付き玉軸受

Photo 1 Ball bearings with labyrinth seal for transmission applications

1. 製品の特長

(1) シール仕様とトルク性能

今回開発したラビリンスシールは従来品に対しシールの先端形状(リップ形状)の改良を行い、従来は接触していたシールと内輪の間に迷路状の最適な「すきま」を設けた非接触式シールである。

これにより、シールの摺動による摩擦損失を低減させることができ、従来品に比べ軸受トルクを半減させることが可能となった。(図1, 図2)

(2) 寿命への影響

トランスミッション用軸受は異物噛み込みによるはく離発生が軸受寿命の主要因となる。今回の開発品は軸受の寿命を著しく低下させる異物が軸受内部に侵入

することを防止できるようにシールと内輪間のすきま(ラビリンス構造)を最適化した。シールと内輪間にすきまを設けているため従来の密封クリーン軸受より異物侵入抑制効果は劣るが、開放型に対しては軸受内部への異物侵入を抑えることができ、軸受の寿命延長効果も得られることが可能である。(図3, 図4)

2. まとめ

トランスミッション用ラビリンスシール付き玉軸受は、電動車の航続距離延長に寄与出来る開発品であり、軸受トルクの低減、長寿命化を実現し、自動車の小型・軽量化、及び効率向上に貢献できる製品と期待する。

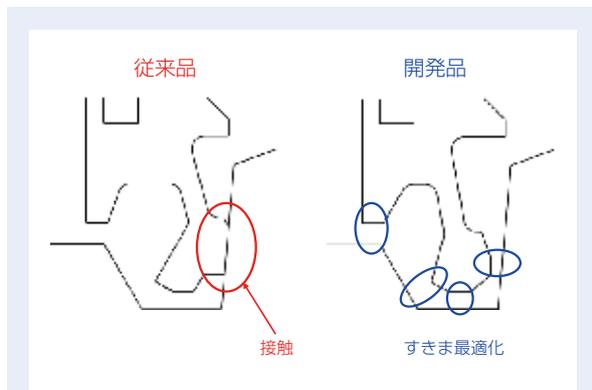


図1 従来シールと開発シールの形状
Fig. 1 Comparison of profile for current seal and newly developed seal

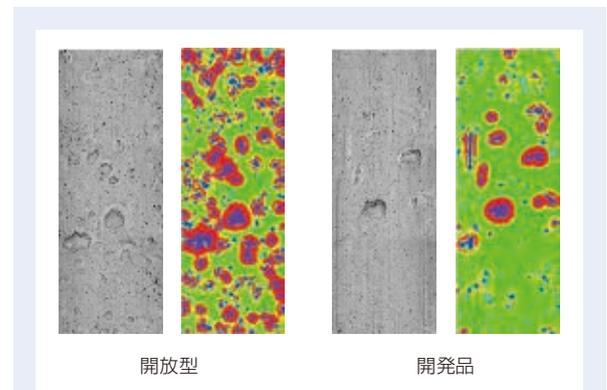


図3 開放型軸受と開発品の異物噛み込み圧痕比較
Fig. 3 Comparison of dents from contaminants for open bearing and newly developed bearing

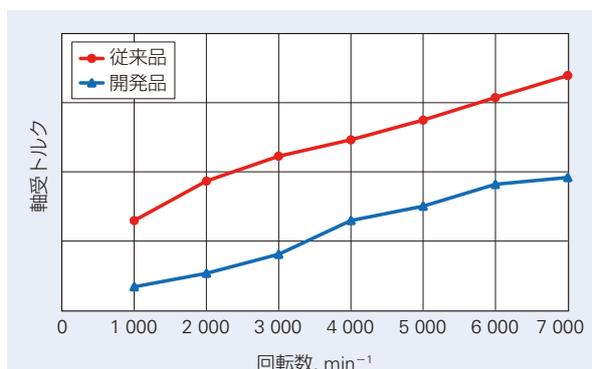


図2 従来シールと開発シールの軸受トルク比較
Fig. 2 Comparison of bearing torque for current seal and newly developed seal

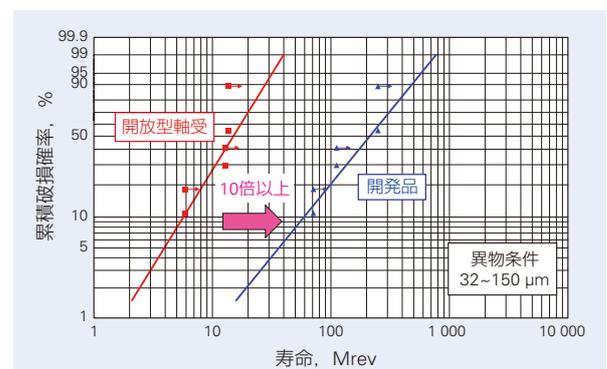


図4 開放型軸受と開発品の軸受寿命試験結果
Fig. 4 Results of endurance testing for open bearing and newly developed bearing

商 品

紹 介 耐クリープ摩耗 BOC 軸受

BOC Bearings with Resistance to Wear from Creep

車両の省スペース・軽量化のため、HEV・EV モーター・減速機ユニットの小型・軽量化に対する要求が厳しくなっており、ハウジングや軸受の薄肉化が進んでいる。そのため、稼働中にハウジングが変形してハウジングと軸受の間にすきまが生じることや、軸受の外輪が変形することで、本来回転しないはずの外輪が回転する“クリープ”と呼ばれる現象の発生が増えている。

クリープが発生して、外輪と接触しているハウジングの摩耗が進行すると、音・振動の増大、回転不良や摩耗粉の発生によるユニット内部品の機能低下を引き起こす可能性がある。その結果、自動車の信頼性や快適性を低下させる懸念があるため、クリープ摩耗対策は転がり軸受にとって重要である。

上記の背景から、NSK では軸受外輪に黒色酸化被膜(BOC)を施し耐クリープ摩耗性を付加した、「耐クリープ摩耗 BOC 軸受」(写真 1)を開発したので紹介する。

1. 構成, 構造, および仕様

BOCはこれまでも耐クリープ以外の目的として軸受に使用されているが、これを外輪に施した仕様である。(写真 2)

軸受のサイズアップや軸受周辺構造の変更を必要とせず、組付け性も被膜を施していない標準品と同様に扱うことができる。



写真 1 BOC 軸受
Photo 1 BOC bearings



写真 2 軸受断面
Photo 2 Bearing cross section

2. 特長

クリープによる摩耗を防ぐ考え方として、外輪のクリープを発生させない(外輪を回転させない)こと、若しくはクリープが発生してもハウジングの摩耗を抑制することの二つの手法が挙げられる。外輪のクリープを発生させない対策として、軸受にフランジやピン等を設けることで機械的にハウジングに固定することが知られているが、コストの増大と組付け性が課題であった。NSKでは、外輪の肉厚をアップさせることによる剛性アップと外輪外径面に設けるOリングの諸元を最適化することにより、静止荷重、回転荷重の両方のクリープを抑制する次世代クリープフリー軸受を開発している。

一方で、寸法の制約から外輪の肉厚アップによる剛性の最適化やOリング仕様の適用が困難な場合には、外輪外径面に低摩擦な固体潤滑剤をコーティングし、軸受とハウジング間の摩擦係数を低減させることで、外輪にクリープが発生してもハウジングの摩耗を抑制することが出来る軸受も開発している。

今回のBOC軸受は固体潤滑被膜と比較するとハウジング摩耗の抑制効果は劣るものの、低コストであることが特徴である。一方向荷重を負荷した試験では標準品に対してハウジングの摩耗量が1/3に低減出来る効果がある。(図1)

3. 用途

これまでクリープ発生要因や周辺環境に応じて、各種クリープ対策を適用してきた。(図2)

寸法の制約がある場合に固体潤滑被膜を適用してきたが、使用環境や許容される摩耗量によっては、より低コストであるBOC軸受が適用可能となる。

本製品は自動車のパワートレインだけでなく、他の自動車用途や各種産業機械分野でもクリープ摩耗が問題となる場合に一定量の摩耗抑制効果が期待できる。

4. まとめ

本製品は、軸受寸法の拡大(外輪の肉厚アップ)を必要とせず、且つ低コストでありながらクリープによるトランスミッション用ハウジングの摩耗を低減することが可能である。

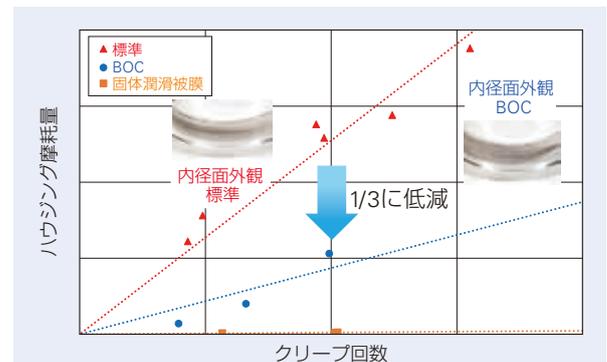


図1 一方向荷重によるクリープ摩耗量試験
Fig. 1 Creep wear test with unidirectional load

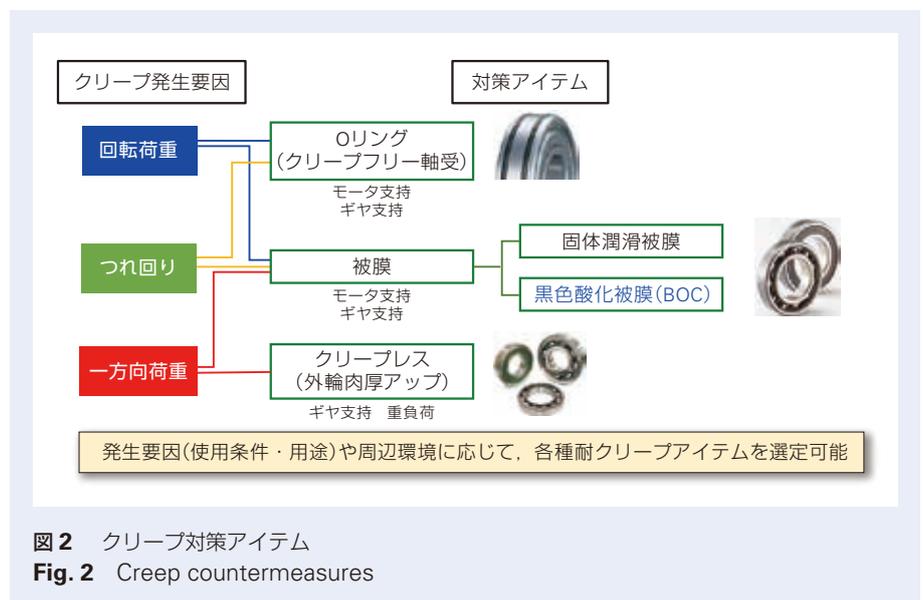


図2 クリープ対策アイテム
Fig. 2 Creep countermeasures

商品

紹介

HEV・EV用高速回転玉軸受 Gen4 の開発

Development of Gen 4 High-Speed Ball Bearings for HEVs /EVs

地球温暖化などの環境問題を背景として、カーボンニュートラルの実現に向けた社会的取り組みが注目される中、環境負荷が小さいHEV・EVの普及が期待されている。電動車の普及に向けた重要課題の一つが航続距離の延長である。そのため、HEV・EV用駆動モータは小型・軽量化が求められている。

モータの出力は、トルクと回転数の積で決まるため、回転数を高めることが出来れば、トルクを小さくすることが可能であり、ロータの体格を小さくすることができる。そのため、HEV・EV用駆動モータの高速回転化が進んでいる。最近では、駆動モータの最高回転

数が $30\,000\text{ min}^{-1}$ を超えるEVユニットの開発も報告されており、駆動モータを支持する転がり軸受にも $30\,000\text{ min}^{-1}$ 以上の高速回転性能が要求されている。

NSKはこれまでオリジナルの高速グリースの適用や保持器の軽量化・材料の高剛性化により、高速仕様Gen2：dmN140万以上、Gen3：dmN180万以上の高速回転軸受を開発してきた。本稿では、更なる高速回転化への対応として開発した、Gen4：dmN210万以上の高速回転軸受について紹介する。



写真 1 HEV・EV用高速回転玉軸受 Gen4

Photo 1 Gen 4 high-speed ball bearings for HEVs/EVs

1. 構成, 構造, および仕様

高速回転玉軸受 Gen4 は、高速回転時に保持器にかかる応力の低減, 及び変形量の低減を可能にする為、Gen3 に対して高剛性材料を使用することで、さらなる軽量化と、形状最適化に伴う高速回転性を両立させた仕様である。

2. 特長

開発した Gen4 の高速回転性能を確認するため、グリース潤滑環境下における、高速回転耐久試験を実施した。

図 2 に試験機の構造を示す。軸を 4 個の軸受で支持しており、両端の 2 個を試験軸受、中央の 2 個をサポート軸受として配置した。試験条件は、ラジアル荷重を軸受の基本動定格荷重の 10 %、試験温度を外輪外径温度が 120 °C となるようにヒータで温度調整を行った。また、1 時間を試験の打ち切り時間とした。

図 3 に試験結果を示す。図 3 に示す通り、Gen4 は $dmN210$ 万の条件にて異常発熱を起こさずに目標時間を達成した。

3. 用途

本軸受の採用により駆動モータユニットの小型化が可能になり、電動車の燃費・電費の向上、航続距離延長、快適性向上に貢献出来る。

4. まとめ

本稿では、NSK が開発した HEV・EV 駆動モータ用のグリース潤滑高速回転玉軸受 Gen4 ($dmN210$ 万以上達成) について紹介した。

今後カーボンニュートラルな社会を実現するために、急速に HEV・EV などの電動車が普及すると考えられている。NSK では、ユーザーの使用環境を十分に把握し、市場のニーズに応える商品開発を継続的に推進することで、HEV・EV の燃費・電費改善及び信頼性の向上に貢献していく。

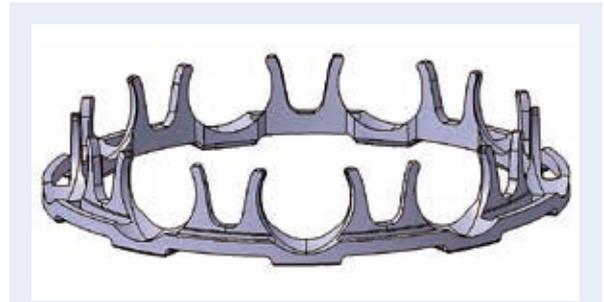


図 1 Gen4 の保持器形状
Fig. 1 Gen4 cage shape

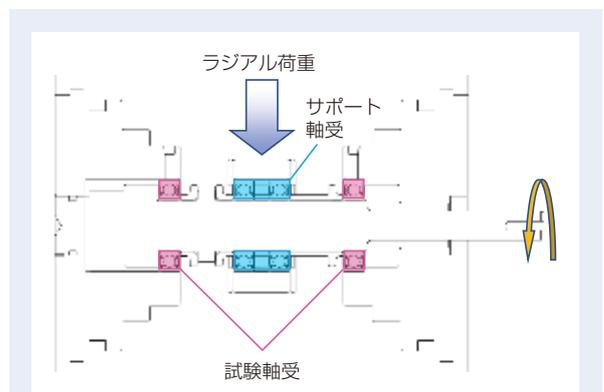


図 2 高速試験機
Fig. 2 High speed rotation tester

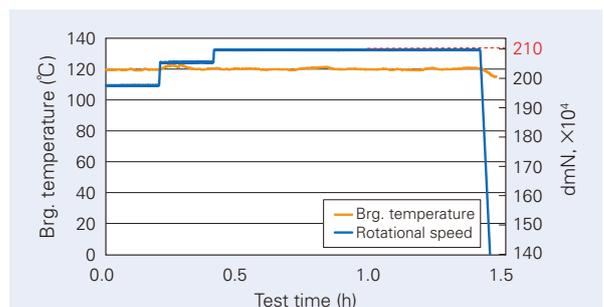


図 3 試験結果
Fig. 3 Test results

商品

紹介

トラック用大型 T-HUB1 軸受

Large-Size T-HUB1 Bearings for Trucks

はじめに

従来のトラック用の車輪を支持するホイール軸受は、単列円すいころ軸受を車両の内側と外側に 2 個 1 対で使用することで、トラックの車両重量を支える機能を持たせている。近年、作業者による点検やメンテナンス、軸受交換作業の効率化が求められており、両側の軸受外輪を一体化した複列のテーパハブユニット軸受(大型 T-HUB1)の採用が進んでいる。

また、一般的な T-HUB1 では、メンテナンスの為に軸受を車体から取り外す際、一方の内輪が軸に固着し、交換時の作業性が悪いという課題があり、作業性やメンテナンス性を向上させることが求められている。NSK は、上記の課題に対応し、従来の軸受寿命を維持しながら、省スペース化を実現したホイール用大型 T-HUB1 を開発したので紹介する。

1. 特長

1.1 トラック用大型 T-HUB1 の各部件の機能

今回開発した T-HUB1 軸受は、従来の円すいころ軸受に対し、複列の外輪を共通化し、耐泥水性と耐デフオイル性を持つ各種シールと金属製内輪連結環から構成される。図 1 に概略図を示す。

以下に各部件の特徴を述べる。

【金属製内輪連結環】

内輪同士を連結し、非分離化する機能をもつ。

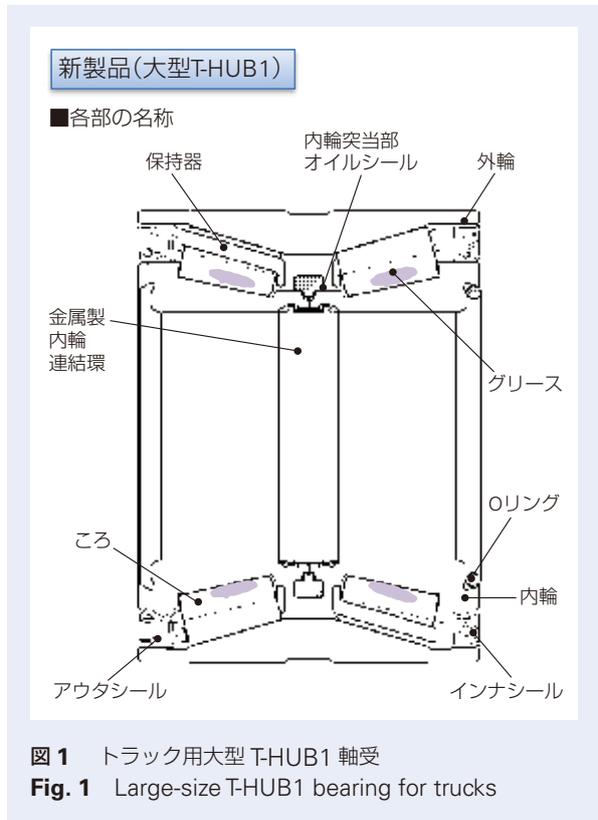


図 1 トラック用大型 T-HUB1 軸受
Fig. 1 Large-size T-HUB1 bearing for trucks



写真 1 内輪連結環装着状態
Photo 1 Connector for inner ring

内輪同士の非分離化が求められるシチュエーションとして次の3点が挙げられる。

- ① 工場での軸受搬送時
- ② 車両への軸受組立作業時
- ③ 車体からの軸受分解時

NSKでは連結環の板厚と形状を最適化することにより、軽量化を図ると共に、上記のシチュエーションにおける非分離化を実現している。

【耐泥水シール】

トラック用ハブユニット軸受には、高い耐泥水性能が要求される。本製品には、耐泥水性に優れたハイ・インテグラルシールにガータースプリングを追加した仕様を採用している。ガータースプリングを設定することで、スプリングにリップが追従する為、シールリップの摩耗が進行しても、シール性を保持することが出来る。

【耐デフオイルシール】

本製品は、ディファレンシャルギアからドライブシャフトを伝ってデフオイルが流れてくる構造で使用されることを想定している。軸受内部にデフオイルが浸入すると、内部グリースの性状が変質する懸念がある為、次の3つの流入経路に対して耐デフオイルシールを設定した。

- 経路① 軸受端面から軸受内部へ(アウトシール)
- 経路② 内輪突き当て部から軸受内部へ
(内輪突き当て部オイルシール)
- 経路③ 内輪内径からブレーキディスクへ
(Oリング)

【保持器】

保持器はころを整列させ、滑らかな回転を保持する機能を有する。本製品では、車両に負荷される旋回加速度を考慮した強度解析を行い、保持器形状を最適化した。これにより、従来の単列円すいころ軸受と比較して大きいサイズのころを採用できるようになった。

その為、本製品では、従来と同等以上の寿命を確保しながら、軸受の省スペース化を実現している。

【グリース】

トラックの使用環境として、トラックドライバーがフットブレーキを多用する為、ブレーキに熱がこもり軸受周辺が高温になる事象が認められている。その為、高温時にも酸化劣化、油分離が生じにくい耐熱グリースを採用している。

2. まとめ

トラック用の大型 T-HUB1 開発について、NSKはこれまで培った技術、知見を活かし、省スペース化や信頼性向上といったレベルアップに取り組んできた。

欧米系トラックメーカーが先行しているトラック向け大型 T-HUB1 は、国内メーカーでも市場への投入が加速していく流れとなっており、本製品を通して市場の要求に貢献していく。

商品

紹介

次世代長寿命プラネタリシャフト(SHJ7)

Next-Generation Long-Life Planetary Shafts (SHJ7)

従来のエンジン車や、昨今普及が進んでいる電動車の一部において、エンジンやモーターの動力をタイヤに伝えるための動力伝達機構に遊星ギヤが採用されている。

この遊星ギヤは自動車の燃費(電費)向上のため、高効率化・小型軽量化が課題となっている。

遊星ギヤは、サンギヤ・リングギヤ・ピニオンギヤの3つのギヤと、ピニオンギヤを支持するプラネタリシャフト・ケージ&ローラ・キャリアから構成される(図1)。中でもプラネタリシャフトはピニオンギヤの支持軸としてキャリアに固定され、ギヤ反力とシャフトの曲がりによる複雑かつ大きな荷重を受けることから、特に耐久性が求められる部位の1つとなっている。そのため、プラネタリシャフトの耐久性を向上させることで、ピニオン部の幅縮小やピニオン数減などの小型軽量化を図ることが出来る(図2)。

NSKではプラネタリシャフトのタイプに応じた各種長寿命アイテムを揃えている。しかし、最も耐久性に優れるアイテム(SHX3)¹⁾は寿命倍率4.5と耐久性には優れる一方で、材料入手性や加工性、コスト面に課題があった。そこで、これらの課題を解決し、より最適な仕様提案と、遊星ギヤの小型軽量化に貢献できる商品として「次世代長寿命プラネタリシャフト」

(写真1)を開発したので紹介する。

1. 特徴

本開発品は、グローバルで調達可能な開発材と、耐久性およびシャフトの変形に有利な特殊高周波焼入れの組合せにより製作する(図3)。

開発材(SHJ7材)²⁾は、ISO規格(国際標準規格)をベースとしたグローバルでの調達が可能な材料である。



写真1 次世代長寿命プラネタリシャフト

Photo 1 Next-generation long-life planetary shafts

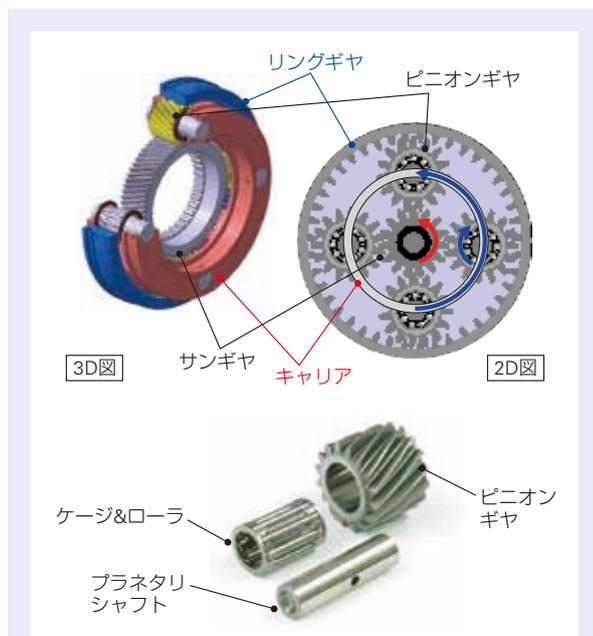


図1 遊星ギヤの構造

Fig. 1 Planetary gear structure



図2 遊星ギヤの小型軽量化の例

Fig. 2 Examples of smaller and lighter planetary gears

特殊高周波焼入れとは、従来の長寿命品でも採用している NSK 独自の高周波技術である。負荷圏に高い耐久寿命を発揮する熱処理品質を確保しつつ、端部などには加締め変形にも耐え得るような組織制御を施すことができ、使用中のシャフトの変形も抑制する。この熱処理により、耐久寿命を向上させつつ、ピン止めタイプ及び加締めタイプの両方に対応が可能となる。

2. 性能

本開発品を用いて、弊社ラジアル試験機にてプラネタリシャフトの耐久試験を行った結果を図 4 に示す。開発品は標準品に対し 3 倍以上の寿命を有していることが確認された。

この開発品を用いた軸受の軽量化効果について図 5 に示す。軸径 12 mm、ころ径 2.5 mm、幅 20 mm のケージ & ローラを仮定した場合、開発品を用いて標準品と同じ軸受寿命とすると、全長を約 20 %、シャフトとケージ & ローラを含む重量を約 24 % 減少させることができる。なお、減少割合は異なるものの、軸径方向に縮小させることも可能である。

3. 用途

本開発品は、遊星ギヤが主流であった自動変速機(AT)向けだけでなく、遊星ギヤが使用される電動車全般に適用可能である。また、車両用途以外の遊星ギヤにも幅広く適用することができる。

4. まとめ

次世代長寿命プラネタリシャフトは、長寿命とグローバルでの調達性を両立させた新商品として、従来のラインナップに追加し、使用される遊星ギヤの使用環境や用途に合わせて最適な提案を行っていく。



図 3 開発品の特徴
Fig. 3 Features of the developed planetary shaft

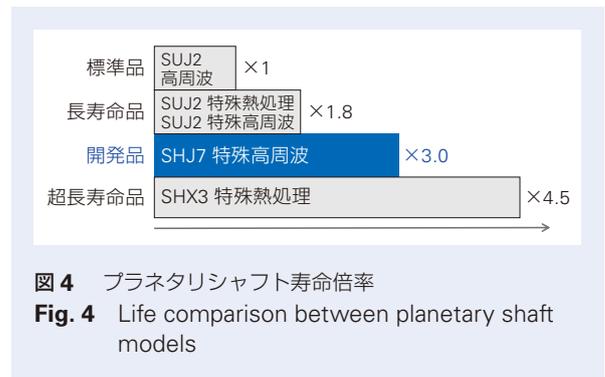


図 4 プラネタリシャフト寿命倍率
Fig. 4 Life comparison between planetary shaft models

参考文献

- 1) 山本幸一, 武村浩道, “自動車用変速機部遊星歯車向け長寿命プラネタリシャフト(SHX3 鋼)の開発” NSK Technical Journal, 686 (2013) 52-57.
- 2) “現調化対応長寿命材 (SHJ7)” NSK Technical Journal, 692 (2020) 90-91.

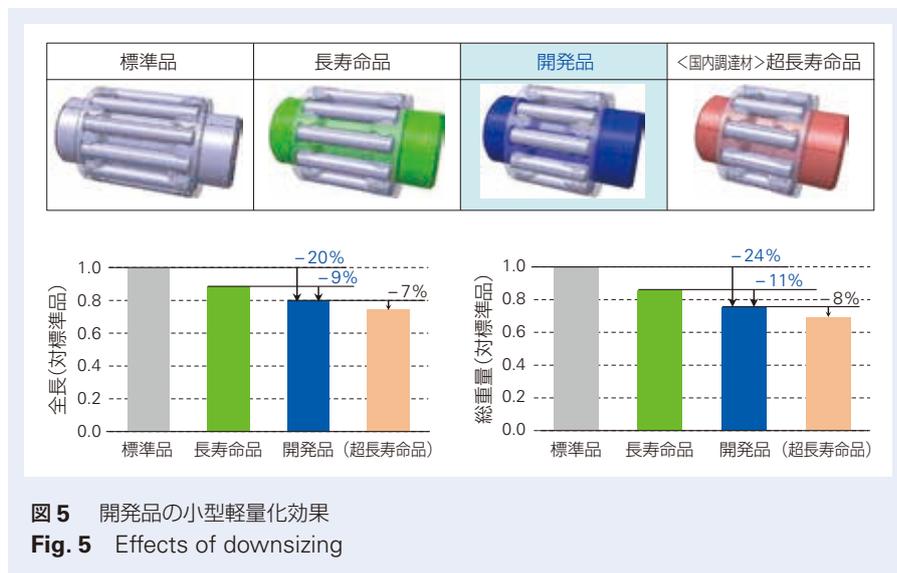


図 5 開発品の小型軽量化効果
Fig. 5 Effects of downsizing

商品

紹介 電動車両用大径シェルニードル軸受

Drawn Cup Needle Roller Bearings with Large Diameter for Electric/Hybrid Vehicles

近年、地球環境への影響から、CO₂ 排出量削減の取り組みとして、自動車は電動車両 (EV・HEV) へ移行が進んでおり、それらのパワートレインに使用される軸受は、従来のエンジン車向けよりも幅広いサイズが求められている。NSK では、これらへの適用を目的に「大径シェルニードル軸受」(写真 1)を開発したので、以下に紹介する。

1. 背景

自動車は車幅の制約が厳しいため、パワートレインは全長を短くする必要がある。

EV 用 eAxle は 1 軸～3 軸式があり、例えば、1 軸式はモーター、減/変速機、デフを同軸に配置している。それらを横並びに配置すると eAxle の全長が長くなる傾向があり、車載ができなくなる場合は、デフ上部に減/変速機を配置し、全長の短縮を図るレイアウトが考案されている(図 1)。

一方、HEV はこれまでトルクコンバータ等を取っていたスペースにクラッチパック (モーターとクラッチを組み合わせたモジュール) を組み込んだものが多いため、クラッチパックはトルクコンバータ等の全長と同等以下でなければならない。そのため、図 1 のようにモーターやクラッチ等の多数の構成部品を径方向に積上げることで全長を短縮している。

上記構造より、パワートレインの一部構成部品が径拡大しており、それを支持する軸受も大径化している。また、少しでも eAxle 及びクラッチパックを全長短縮、径縮小するために、構成部品及び軸受は幅狭化、薄肉化が必要で、これらの傾向に対応していく必要がある。

2. 構成、構造、および仕様

従来のシェルニードル軸受は、熱処理済み外輪に鉄保持器ところを挿入した後、外輪片側縁を加熱しながら折り曲げて罅を成形している。本製品は、外輪罅成形後に熱処理を行い、1 分割型樹脂 C&R を径収縮させて組付ける新しい仕様を採用した(図 2、図 3)。以下に特徴を示す。



写真 1 大径シェルニードル軸受
Photo 1 Drawn cup needle roller bearings with large diameter

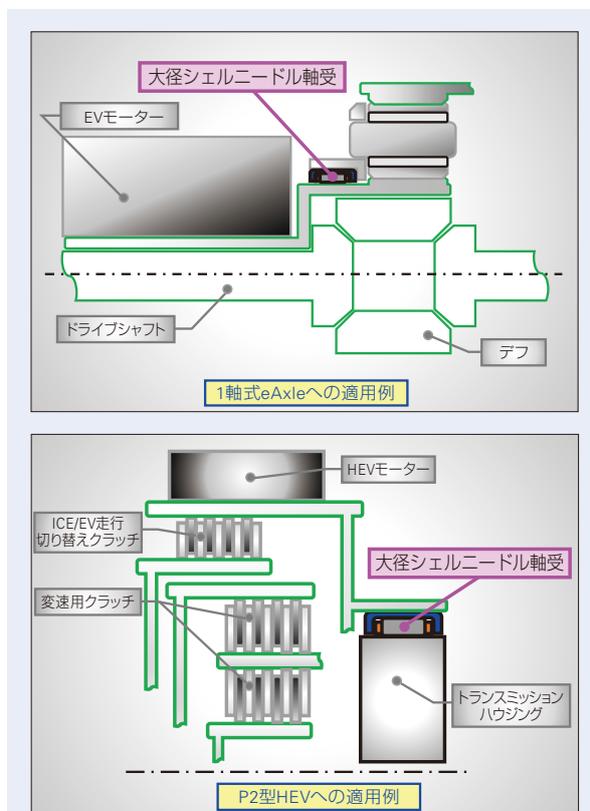


図 1 1 軸式 eAxle 及び P2 型 HEV への適用例
Fig. 1 Example applications in single-axis eAxle and P2 HEV

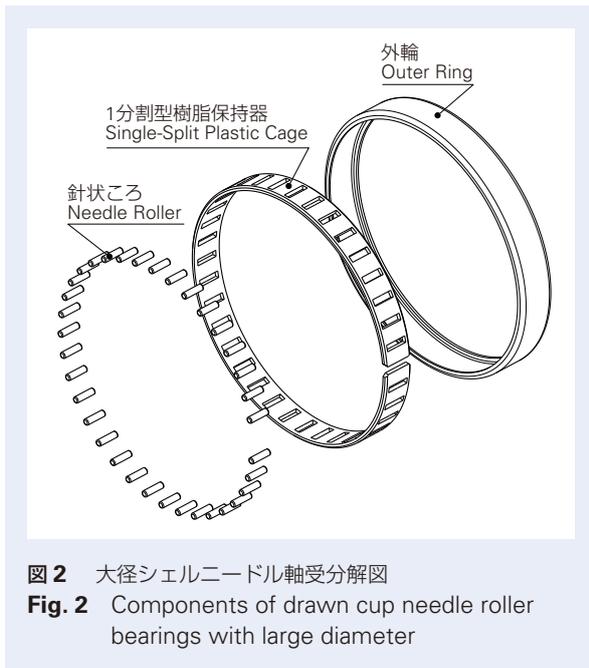


図2 大径シェルニードル軸受分解図
Fig. 2 Components of drawn cup needle roller bearings with large diameter

3. 特長

3.1 大径

従来仕様は、熱処理済み外輪の鏝を再加熱し、折り曲げて成形をしているため、外輪寸法が再加熱の影響を受けやすい。本製品は、新たに、熱処理前に鏝を成形することで、外輪寸法が安定し、大径化が実現できた。現在は外径 ϕ 120 mm程度まで対応可能で、今後も更なる拡大開発を進めていく(図4)。

3.2 幅狭

従来仕様は、幅狭品でころ長を外輪幅に近しく設計すると、加熱された外輪鏝近傍の軌道面は硬度が低下しているため、寿命が低下する課題があった。これを避けるために、熱処理前に鏝成形を行い、軌道面硬さの低下とその結果である寿命低下を解決することで、外輪幅狭でもころ長が短くならず、寿命を確保できる仕様を実現した。現在は幅10 mm程度まで対応可能で、今後、更なる幅狭仕様の開発を進める(図4)。

3.3 薄肉

大径薄肉品は、鉄保持器の剛性が低下し、熱処理変形が大きくなるため、寸法が安定せず、製造が困難であった。新たに樹脂保持器を採用することで、この課題を解決し、薄肉を実現した。現在は断面厚2.5 mm程度まで対応可能で、更なる薄肉化を図っていく(図4)。

4. 性能

EV・HEVの使用環境を想定した寿命試験では、定格疲れ寿命と同等以上の寿命を有することを確認し



図3 シェルニードル軸受の組立方法
Fig. 3 Assembly of drawn cup needle roller bearings with large diameter

た。また、高速回転試験では、許容回転数の3.5倍の回転数でも破損しないことを確認している。

5. まとめ

シェルニードル軸受の大径化・幅狭化・薄肉化を実現したことで、電動化に貢献できるものとする。今後、さらなる軸受サイズのニーズ変化に備えて、開発に取り組んでいく。

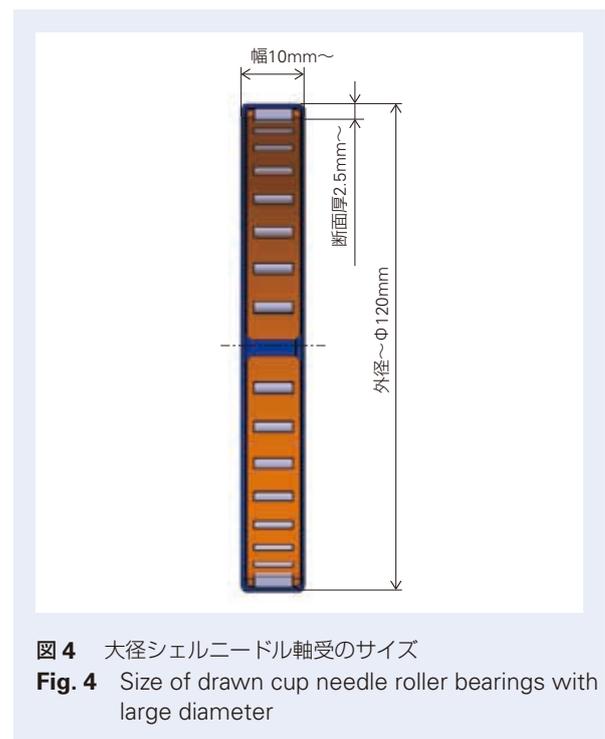


図4 大径シェルニードル軸受のサイズ
Fig. 4 Size of drawn cup needle roller bearings with large diameter

商 品

紹 介

舵角センサレス検出機能を搭載したコラムタイプ EPS
Column EPS with Steering Wheel Angle Detection

昨今、車両 ADAS（先進運転支援システム）の拡充により、車両におけるハンドル角度（以下、舵角）情報の重要性が増している。従来のシステムでは、舵角のセンシングのため、専用の舵角センサをハンドル内部や EPS（電動パワーステアリング：図 1）内に設けていたが、サイズや部品の増加、コストアップの課題があった。

弊社では、ADAS 普及において必須となる舵角情報を、舵角センサを設けずに、EPS システム内に有するモータ角度センサと操舵トルクセンサの情報によって算出し、OEM の車両制御や EPS 内で活用できる独自の機能を開発し、商品化した（図 2）。

1. 構成、構造、および仕様

ステアリングの舵角とは、車両直進状態のハンドル中立角度を基準とし、右転端から左転端間（ロック to ロック間）の約 3 回転内の絶対角度であり、機能開発には、この検出が必要となる。（従来の舵角センサはこの多回転の絶対角度検出のため減速ギアやバーニア機構を内蔵し、イグニッションオン時にも舵角を検出できる構成としていた。）

EPS ではアシスト用モータを制御するためのモータ角度センサが備わっているが、舵角算出機能として、

- ・ハンドル絶対角度の算出
- ・ハンドル中立角度の設定と記憶
- ・検出精度の確保（分解能、精度、応答性等）
- ・信号信頼性の確保、診断が必要となる。

開発したシステムの機能ブロックを図 3 で示す。

舵角は、モータ角度センサの角度情報を減速機を介したステアリング軸角度に変換し算出する。

中立角度の初期位置は車両出荷時にキャリブレーションで設定する。イグニッションオン中は上記の角度算出をおこなうが、イグニッションオフ時においても角度検出機能を維持するために、2 系統あるモータ角度センサの 1 系統分の電源、センサ、角度カウンタを活かし機能を継続させている（図 3 破線部）。また、舵角情報の信頼性に関しては、2 系統の角度情報を用いた診断で信頼性を確保している。演算した舵角は

EPS 内の制御に使用すると共に、通信によりリアルタイムに車両に伝達され、ADAS 等の車体制御に使用される。

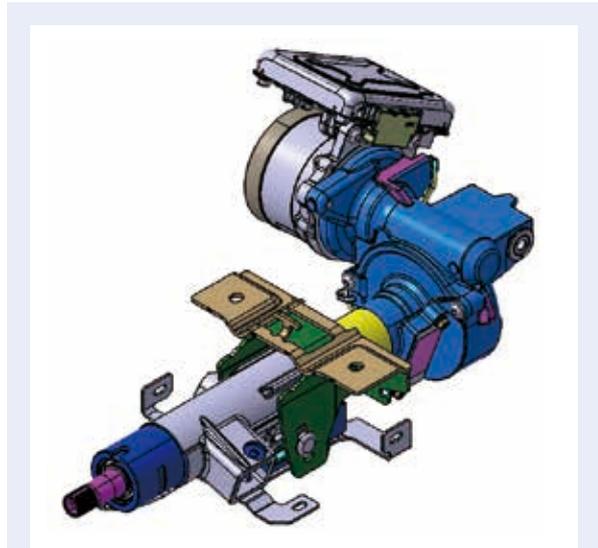


図 1 コラムタイプ EPS システム
 Fig. 1 Column EPS system

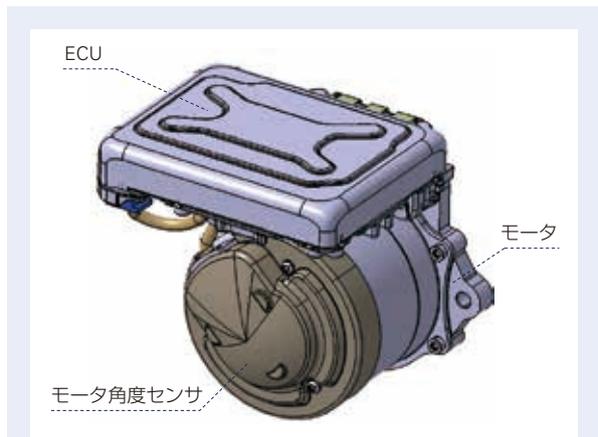


図 2 ECU Motor ASSY
 Fig. 2 ECU Motor Assembly

2. 特長

開発した舵角検出システムは、下記の特長を有する。

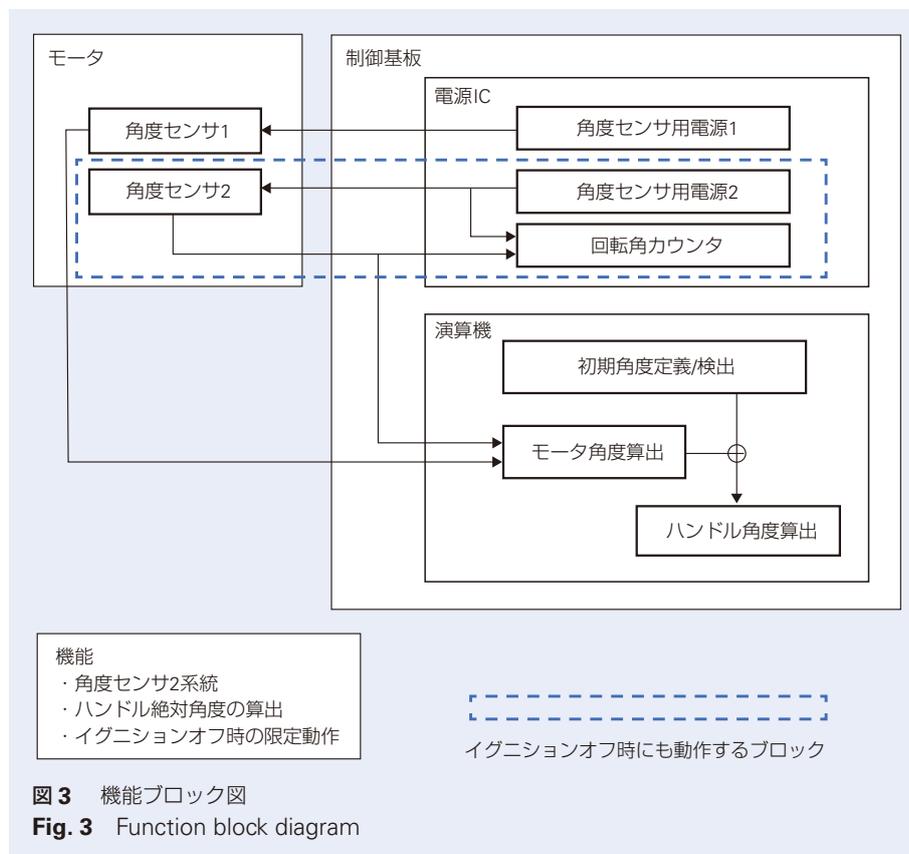
- ・省センサ：
EPS の構成で多回転ステアリング舵角検出が可能。舵角センサを不要とし、コンパクト、低コスト化が可能。
- ・高精度：
アシストモータを制御するための高精度のモータ角度センサ信号を活用し、ADAS 機能の制御に十分な精度、分解能、応答性を確保。
- ・高信頼性：
省センサによる故障リスク低減(故障率低減)、センサ相互診断等による機能信頼性を確保。
- ・舵角検出の継続機能、低消費電流化：
イグニションオフ時の角度検出サンプリング作動の適正化により超低バッテリー消費電流化。
- ・舵角中立点のキャリブレーション機能：
バッテリー交換などに伴う中立点キャリブレーション機能搭載。

3. 用途

- 「舵角センサレス検出機能搭載 EPS」
- ・搭載要求が高まる舵角検出機能を専用の舵角センサの搭載なしで実現
- ・コンパクト、低コストで構成可能

4. まとめ

ADAS 搭載車が主流となり、コスト競争が激化する中で NSK の EPS としてハンドル角度検出機能を標準搭載機能とし、シリーズ化を図っていく。



製鉄設備用軸受の技術動向



野村 剛*

野村 剛

Technical Trends in Bearings for Steelmaking Equipment

T. Nomura

Steel products are indispensable as basic materials that support economic activities and social life. Demand for steel is expected to continue to increase steadily due to economic growth and population growth in emerging countries.

Due to growing environmental awareness in recent years, steelmakers are developing production methods and productivity improvements to lessen environmental impacts while offering high-value-added products aimed at carbon neutrality.

Bearings for steelmaking equipment must improve production while offering long life and high reliability to reduce CO₂ Emissions.

Here, we summarize the problems facing bearings used in major steel production equipment and report on the latest technological trends.

- | | |
|---|---|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. まえがき 2. 製鉄工程 <ol style="list-style-type: none"> 2.1 焼結設備 3. 製鋼工程 <ol style="list-style-type: none"> 3.1 転炉設備 3.2 連続鑄造設備(以下連鑄機と称す) | <ol style="list-style-type: none"> 4. 圧延工程 <ol style="list-style-type: none"> 4.1 圧延設備 4.2 多段圧延機用バックアップロール軸受の開発 4.3 特殊圧延機の使用条件過酷化への対応 5. あとがき |
|---|---|

1. まえがき

製鉄製品はインフラの基盤となる道路、橋梁、建築物、交通や運搬に使用される自動車、車両や船舶、そして食料容器材料に使用される飲料缶や食缶など、経済活動や社会生活を支える基礎材料として必要不可欠なものである。2020年の世界粗鋼生産量は18.6億トンに達した。今後も新興国の経済成長、人口増加などにより、製鉄製品の高い需要は持続すると考えられる。一方で、社会構造の変化、とりわけ環境に配慮した生産や製品が強く求められている。そのため、製鉄メーカー各社は、二酸化炭素排出量の削減、省エネルギーなど、環境負荷を低減させる活動や高付加価値製

品(自動車向け高機能のハイテン鋼^{*1}や電磁鋼板^{*2}など)の開発、そして高度化された予知保全による設備の安定稼働やメンテナンスコスト削減、さらに設備の拡幅・拡大による処理能力の増大、高速運転などによる生産性向上への取り組みを進めている。

製鉄工程は大きく分けて、製鉄工程(原料を溶かして溶鋼を作る設備)、製鋼工程(溶鋼の成分調整を行い固める設備)、圧延工程(固めたものを圧延ロールで板や棒の形に造りこむ設備)がある(図1)。その各工程における設備にはISOで規格化された標準軸受から特定用途向けの専用軸受まで、多種多様な形式、サイ

* 産業機械軸受技術センター、産機・グローバルアフターマーケット(GAM)技術部、鉄鋼G

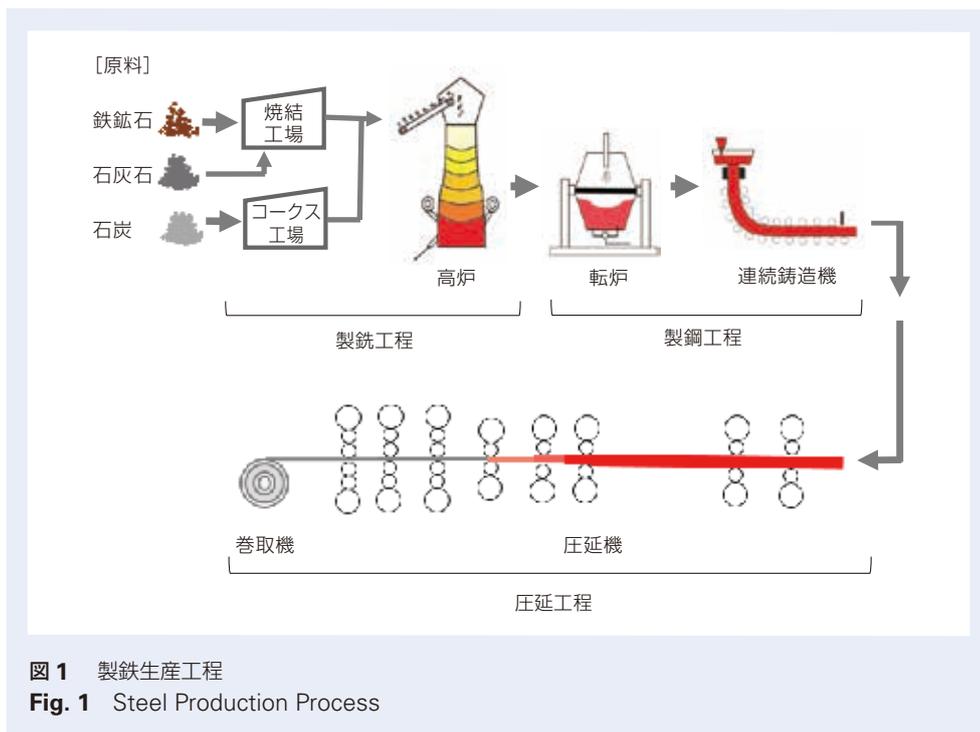


表 1 主な製鉄生産工程ごとの軸受使用環境とニーズ

Table 1 Bearing Operating Environments and Needs by Type of Steelmaking Equipment

製鉄工程	主要設備	使用環境	軸受ニーズ
製鉄	焼結	高温 低速 衝撃荷重, 偏荷重 粉塵	密封性 外輪強度 耐荷重性能 (重荷重負荷能力)
製鋼	転炉	軸受かつ周辺部品が大形であるため, 軸受の取り扱い困難	ハンドリング性
	連続铸造機	高温 (ロールの伸び) 極低速 重荷重 (ロールのたわみ) 水 (水蒸気) 酸化スケール	スムーズにロールの伸びを逃がす 耐摩耗性 調心性
圧延	圧延機 (4 段, 6 段式など)	サイクル運転 (高速⇔低速) 重荷重 冷却水 (圧延水) 酸化スケール 超高速	密封性 耐異物性 (鉄粉, 水) 高速性
	多段圧延機	高速 重荷重 冷却水 (圧延水)	密封性 シールの取付け・取外しの容易さ
	特殊圧延機	低速 偏心荷重 (重荷重)	耐荷重性能 (重荷重負荷能力)

ズの軸受が使用されている。また、工程ごとに潤滑方式、使用環境が異なり軸受に要求される機能も異なる。

これらを工程ごとにまとめると表 1 のようになる。

本稿では製鉄工程の主要設備に使用される軸受の最新の技術動向を紹介する。

- *1：ハイテン鋼：High Tensile Strength Steel（高張力鋼）。強度、加工性を確保しつつ軽量化が可能である。
- *2：電磁鋼板：モーター、発電機、変圧器などの鉄心に使用される。結晶構造の方向性の制御などによりそれらの機器効率が大きく左右される。

2. 製鉄工程

2.1 焼結設備

焼結は、高炉で鉄鉱石から銑鉄を作り出すため、事前に粉鉄鉱を適度なサイズに焼き固める設備である（図 2）。近年、高炉の大形化に伴い焼結の能力を増大させるため、パレット台車の拡幅化や機長延長などの取り組みが進められている。

軸受は車輪部（パレット台車がレール上を走行する）と中ローラ部（軸受外輪外径面とスプロケットが噛み合い、パレット台車を駆動させる）に使用されている（図 3）。

そのうち中ローラ用軸受は、従来すべり軸受が使用されていたが、軸受内部への異物（焼結粉塵）侵入による早期損傷や頻繁なグリース補給、周囲へのグリース漏れ出しによる設備周りの汚れ、排脂処理費用などのメンテナンスコストの増大が問題となっていた。その対策として密封タイプの総ころ円筒ころ軸受への置き換えが進められ、設備の信頼性向上や現場環境の改善、メンテナンスコスト削減を可能にした。

しかし、前述した焼結能力の増強により、パレット台車の積載量が増大し、スプロケットはより大きな駆動力が必要となり、衝撃荷重や偏荷重によりスプロケットと中ローラの外輪外径噛み合い面の偏摩耗や外輪割れ、軌道面のブリュネル圧痕などの不具合が生じるようになった。

この対応として軸受の設計仕様を見直し、外輪肉厚アップにより割れを抑制し、さらにニードル状のころを多数配置し静的負荷能力を大幅に向上させ、突発不具合のリスクを低減させた（図 4）。対策後の軸受は、実機設備において安定稼働が確認されている。

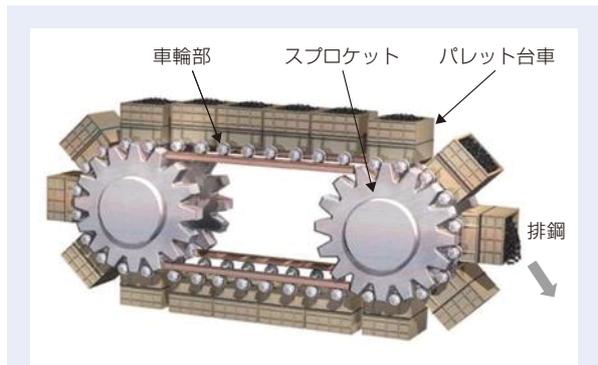


図 2 焼結設備
Fig. 2 Sintering Machine

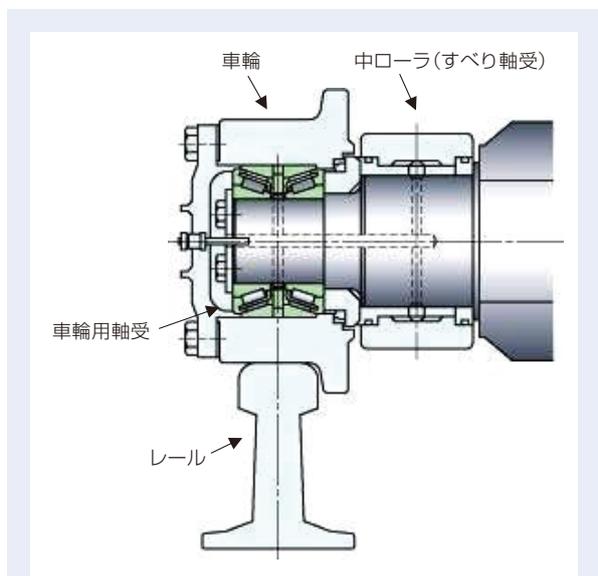
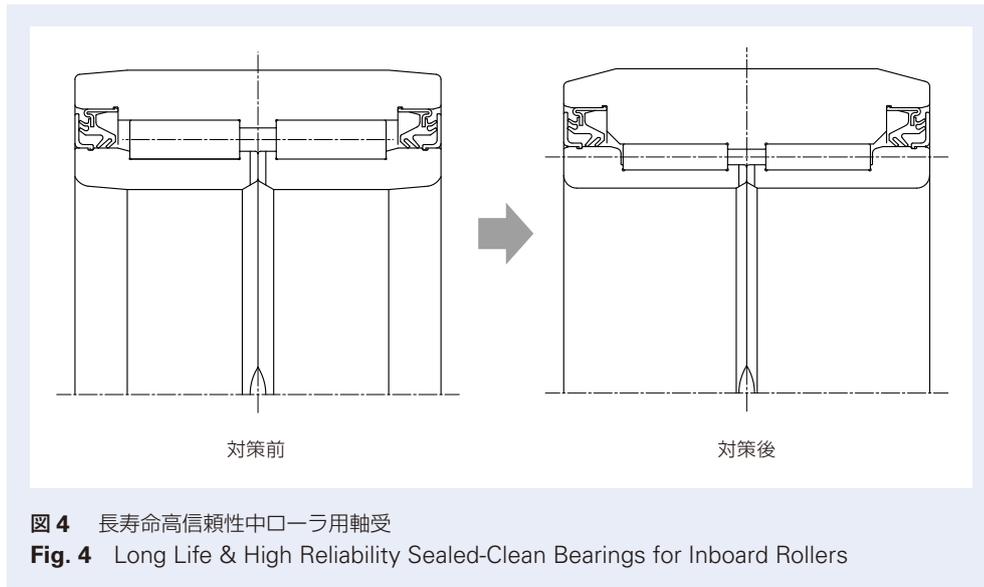


図 3 パレット台車車輪部
Fig. 3 Wheel Components in Pallet Truck



3. 製鋼工程

3.1 転炉設備

転炉は銑鉄に酸素を吹付け、溶けた銑鉄中の炭素を除去し、成分調整及び不純物を浮上させて、高純度の溶鋼を作る設備である。

転炉の構造を図5に示す。転炉両側のトラニオン(砲耳)部には、外径が1.5 mから2 m程度の大形自動調心ころ軸受(一体型軸受)が取付けられている。

大形軸受は質量が大きいため取扱いが難しく、メンテナンスの際、特に固定側軸受は、巨大なブルギア(直径約10 mの大歯車)を含む駆動装置一式を取り外さなければならず、この作業に多くの時間と費用が発生していた。さらに突発事故により急な軸受交換が必要となった場合、下工程の生産停止のリスクも大きかった。



この問題を解決するため、ブルギヤを外さずに軸受交換できる二分割自動調心ころ軸受（図6：二分割軸受）が、開発された。

この開発軸受は、従来の一体型軸受との置き換えを可能とするため互換性を持たせる必要があり、部品を全て環状二分割とするとともに、制約された寸法内で定格荷重の減少を補うためピン形式の保持器を採用した。

この二分割軸受の開発によりブルギヤの着脱をなくし、軸受を交換することが可能となった。

一方、二分割された大形部品を精度よく組立てるにはノウハウが必要となり、軸受メーカー側のサポートが重要となる。当社はこれまで日本国内への導入を拡大してきたが、近年では中国をはじめとする新興国での現場サポート体制を整え、採用を拡大している。従来の一体型軸受での交換作業は2週間程度の工期が必要となっていたが二分割軸受では半減することが確認されている。

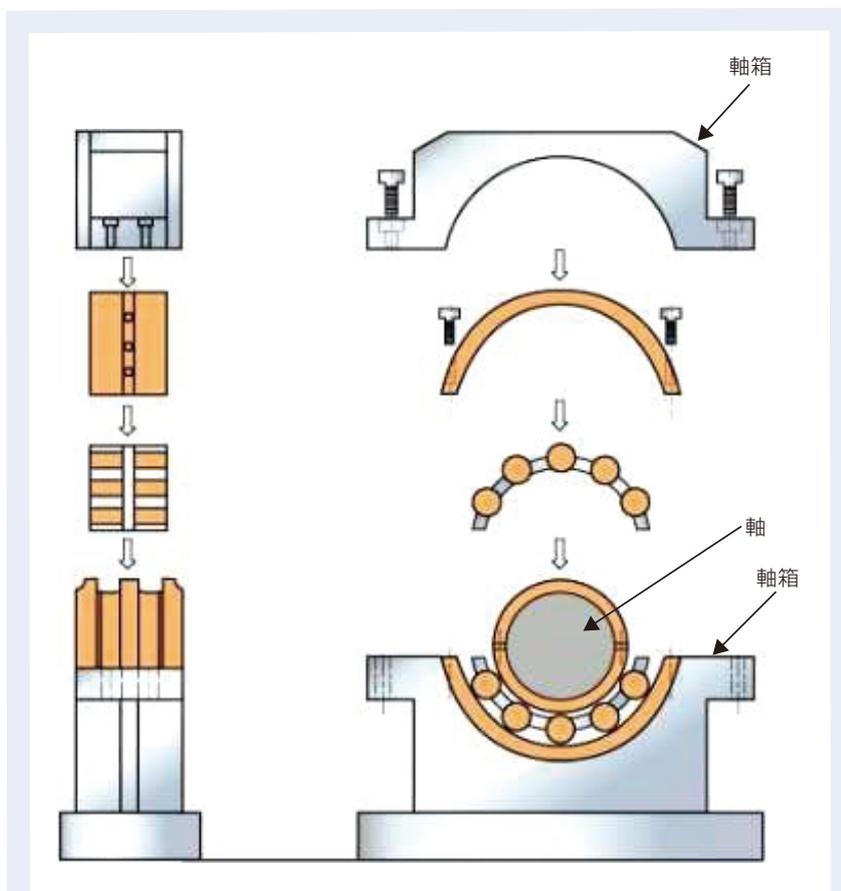


図6 トラニオン固定用二分割自動調心ころ軸受
 Fig. 6 Split Spherical Roller Bearing for Fixed Side of Converter Trunnion

3.2 連続鋳造設備(以下連続機と称す)

連続機の上からガイドロールの間に溶鋼を通し、表面を冷却水で凝固させながら連続的に鋼片(スラブ、ブルーム、ピレット)を製造する設備である。

代表として幅広の鋼片を製造するスラブ連続機の構造を図7に示す。

ガイドロール(図8:以下ロール)には、たわみを許容しながら重荷重を負荷できる機能が求められるため、調心性を有する軸受が内輪回転で使用されている。軸受は固定側と自由側に配置され、一般的に日本国内では、固定側にはラジアル荷重とアキシャル荷重を負荷できる自動調心ころ軸受(図9)、自由側には鋼片の熱影響によるロールの伸びをころと内輪軌道面間でスムーズに逃がすことができる分離タイプの調心輪付総ころ円筒軸受(図9)が使用されている。海外では、連続機の構造の違いから自由側には非分離タイプのトロイダルころ軸受(図9)が多く使用されている。

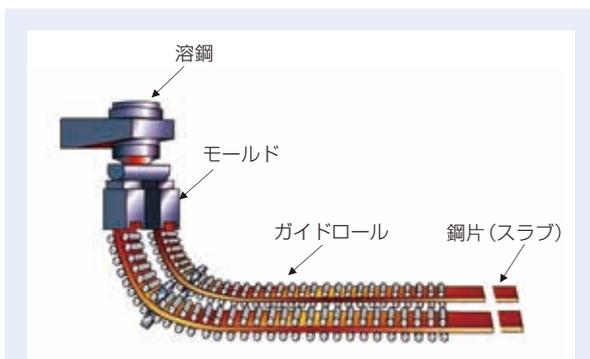


図7 連続機の構造
Fig. 7 Structure of Continuous Casting Machine

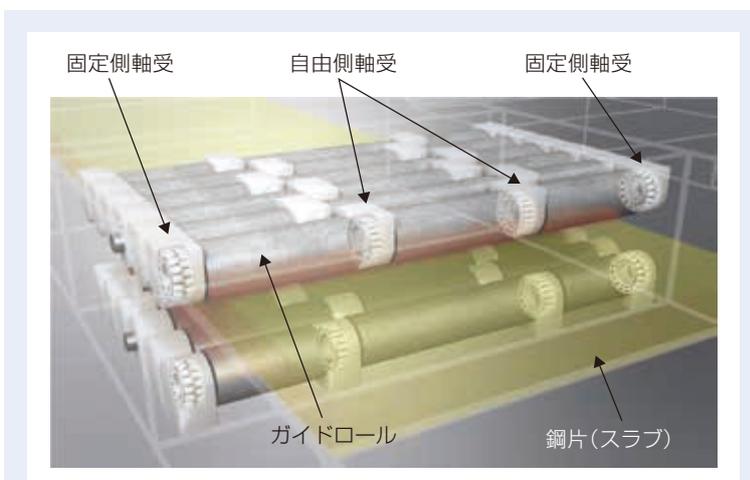


図8 ガイドロールの構造
Fig. 8 Structure of Guide Rolls

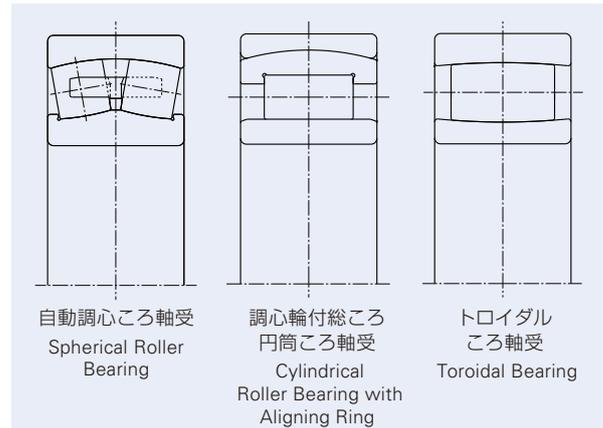


図9 ガイドロールの軸受形式
Fig. 9 Bearing Types for Guide Rolls

連続機用軸受は毎分数回転の極低速で、基本動定格荷重の30%以上もの重荷重が負荷されるため、軌道輪ところの間では潤滑剤の油膜が形成されにくい。また、ロール周辺は多量の冷却水や水蒸気及び酸化スケール(鋼片表面から剥がれた酸化鉄粉)にさらされる過酷な環境にあり、それらが軸受内部に侵入し潤滑不良を起こしやすい。さらに自動調心ころ軸受やトロイダルころ軸受は球面状のころが使用されているため、形状に起因した軌道輪間での特有のすべり摩耗が加速し、早期はく離や割れによる突発生産停止や製品品質に影響を与える場合があり、軸受不具合の解決による設備の信頼性向上が求められていた。

一方で製鉄メーカーでは設備保全周期の延長による生産性向上、メンテナンス費用を削減させるため、ロールや軸受の長寿命化の取り組みが進められている。

設備の対策として、ハウジングのシール性能向上や潤滑方式をグリースからオイルエアに変更することによる潤滑改善が進められ、その効果が確認されている。

軸受の対策としては、上述した球面状のころを有する軸受特有のすべり摩耗からの問題を解決するため、当社では以下の軸受を開発し、市場導入を拡大している。

以下に開発軸受の特長を説明する。

3.2.1 耐摩耗自動調心ころ軸受(SWR 軸受)

SWR 軸受はバナジウムを添加した NSK 独自の開発鋼に、最先端の浸炭窒化技術を駆使することによって、数十ナノメートルのサイズの微細で高硬度な炭窒化物を多量に析出させ (図 10)、耐摩耗特性とはく離寿命特性を大幅に改善した軸受である。また、表面硬化型とすることにより、完全硬化型である従来鋼 (SUJ) と比較して心部の靱性を飛躍的に向上させることで、割れリスクを大幅に低減している。SWR 軸受は実機スラブ連続機における SUJ を用いた自動調心ころ軸受との比較において、寿命延長効果による保全周期延長、メンテナンスでの廃棄数の減少と再利用率の向上が確認されている。

3.2.2 高性能円筒ころ軸受(NUB 軸受)

NUB 軸受は外輪、内輪、ころ、止め輪の 4 つの部品で構成された新形式の総ころ形の円筒ころ軸受である (図 11)。以下にその軸受の特徴を示す。

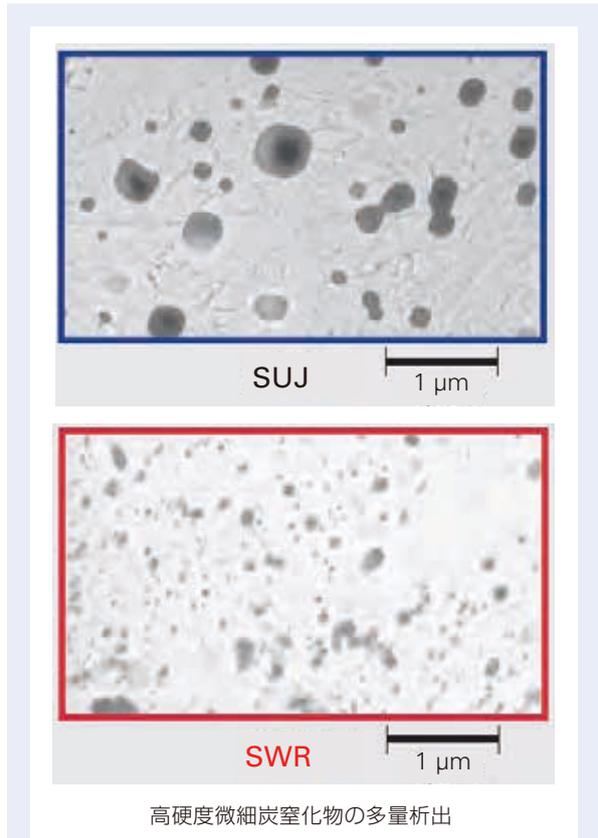


図 10 SWR の微細組織
Fig. 10 Microstructure of SWR Steel



図 11 開発軸受の特徴
Fig. 11 Appearance and Structure of NUB Bearings

1)長寿命

総ころ形円筒ころ形式により負荷容量を最大化し、内部設計の最適化により、すべり摩耗の原因となる軌道面の滑り接触を抑制した。

社内耐久試験において球面状のころを有する従来軸受と比べ3倍以上の長寿命を確認した(図12)。

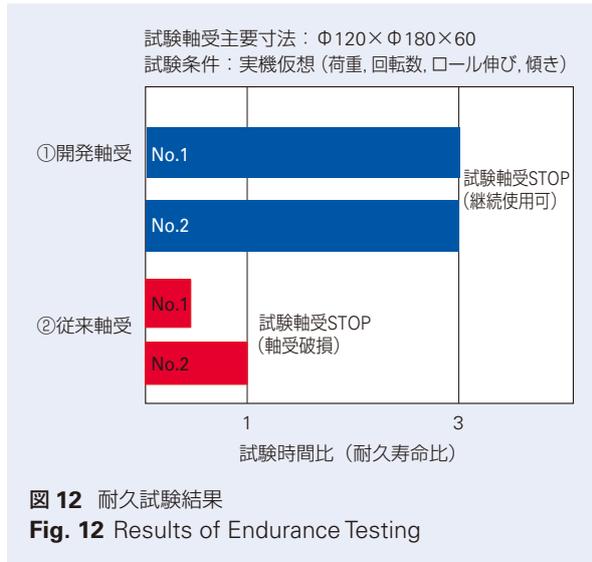


図12 耐久試験結果
Fig. 12 Results of Endurance Testing

2)調心性及びロール伸びの吸収

ころと軌道輪間に最適なクラウニング形状を適用し、傾き(たわみ)の作用に対して軸受内部の面圧分布を均一化させる(図13)。さらに内輪・外輪の相対移動でロールの伸びを滑らかに逃がす。

3)取扱い性の向上

非分離構造により専用工具を必要とせず組付作業性を大幅に向上させた(図14)。

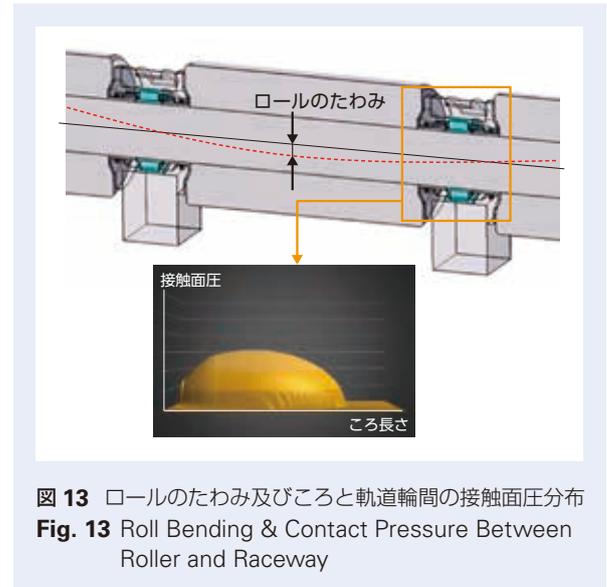


図13 ロールのたわみ及びころと軌道輪間の接触面圧分布
Fig. 13 Roll Bending & Contact Pressure Between Roller and Raceway

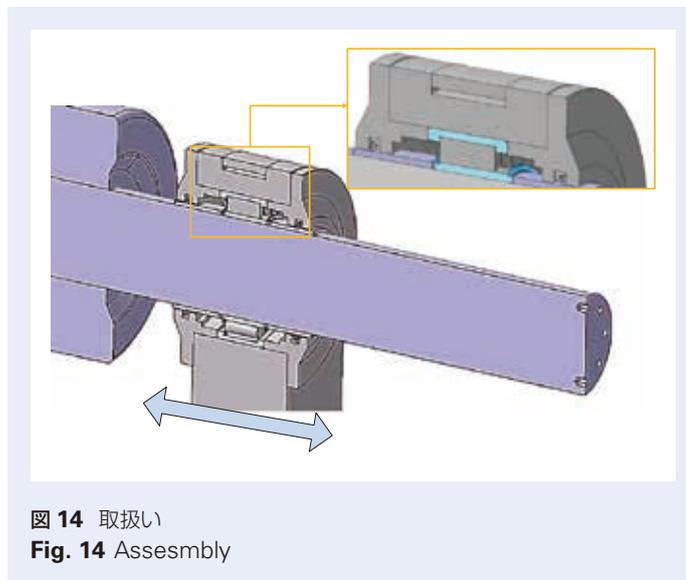


図14 取扱い
Fig. 14 Assesmbly

4. 圧延工程

4.1 圧延設備

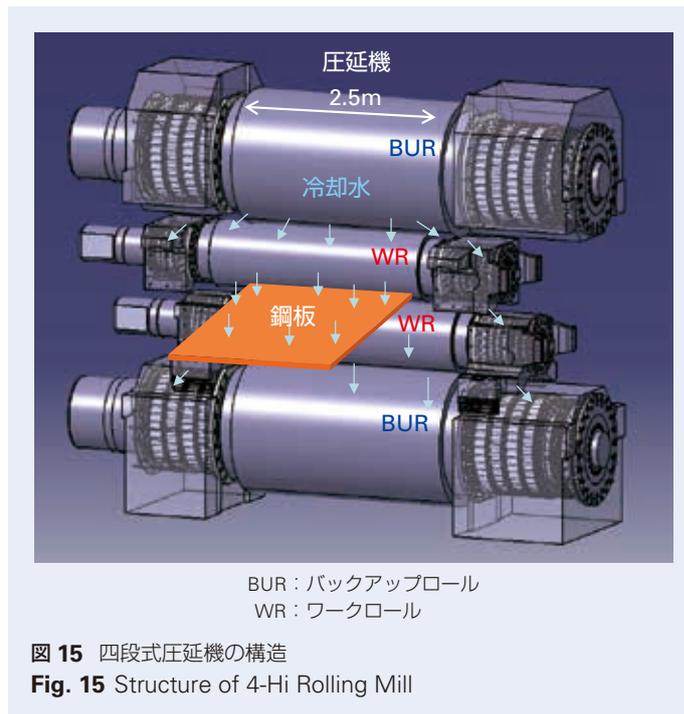
圧延機は回転する二つのロールの間に高温又は常温の金属を通して力をかけて延ばし、所定の形状や精度に仕上げる設備で、板鋼、棒鋼、形鋼、線材用などがある。板鋼の圧延に代表される圧延機の構造例を図15に示す。圧延機はワークロール(WR)と、それを支持するバックアップロール(BUR)で構成される。それぞれのロール両端部(ジャーナル部)に配置される軸受をロールネック軸受と呼んでいる。WRのロールネック軸受(以下WR軸受)は、主に四列円すいころ軸受がグリース潤滑で使用される。BURのロールネック軸受(以下BUR軸受)には、ラジアル荷重用として四列円筒ころ軸受が、アキシアル荷重用として複列円すいころ軸受が強制循環給油又はオイルミスト、オイルエア潤滑などで使用される。軸受の使用条件は、回転速度が低速から高速まで広範囲であり、さらに重

荷重下で運転される。軸受の周辺は大量の冷却水(又は圧延水)や異物(酸化スケールなど)が飛散しており、軸受にとっては非常に厳しい環境である。

その中で特にWR軸受は圧延材から近く、冷却水や異物の影響を受けやすく、従来から潤滑不良などによる軸受の早期損傷が多い部位であることが知られている。当社では異物混入が早期はく離の要因になることを掴み、この対策としてWR軸受の密封化や長寿命材料[スーパーTF]^{*3}を開発し市場導入を拡大してきた。

近年ではさらなるWR軸受の長寿命化による保全周期の延長及び高速生産化の課題への対応の要望が強くなり、以下にその取り組みを紹介する。

*3: スーパーTFは特殊な材料熱処理により高硬度の微細炭化物、窒化物を大量に分散生成させて表面の硬さを高めつつ、残留オーステナイト量の最適化を図り、異物混入下において発生した圧痕縁での応力集中を緩和させた長寿命化材料である。



4.1.1 密封 WR 軸受の設計負荷容量の最大化

WR 軸受は負荷される荷重が基本動定格荷重の 30%以上と厳しく、更に軸受内部への異物侵入や水浸入による潤滑不良要因の早期損傷を抑えるため、密封形式での高負荷容量設計が求められる。一方で、オイルシールを配置するスペースを確保するために同寸法の開放形軸受よりも負荷容量が大きく低下する問題があった。この対策として高負荷容量密封四列円すいころ軸受（図 16）を開発した。本軸受はオイルシールをコンパクトにして、軸受内部の設計を最適化することで、ころの長さを拡張させ、より多くのころが配置可能となり、開放形と同レベルの基本定格荷重を実現した。

4.1.2 密封 WR 用耐水グリースの開発

前述したように WR 軸受の早期損傷の要因は、異物侵入のほかにも水浸入による潤滑不良の影響が挙げられる。

軸受内に水が浸入すると、軌道面ところ間の油膜が切れやすく、金属接触が生じ、早期はく離や錆びが発生することが確認されている。その対策として従来グリースと比べ軸受内部に水が浸入しても軸受の早期はく離や錆びの抑制可能なグリース（図 17）を開発した。このグリースは組成の最適化及び特殊添加剤の配合により、軌道面に厚い油膜と保護膜を生成（図 18）し、水が浸入した場合でも潤滑不良によるはく離や錆びを抑制する。水浸入下での円すいころ軸受による社内試験において大幅な寿命延長と高い防錆効果を確認した。さらに実機試験において開発グリース封入した密封 WR 軸受は早期損傷を抑制し、メンテナンス周期の延長を可能にした。

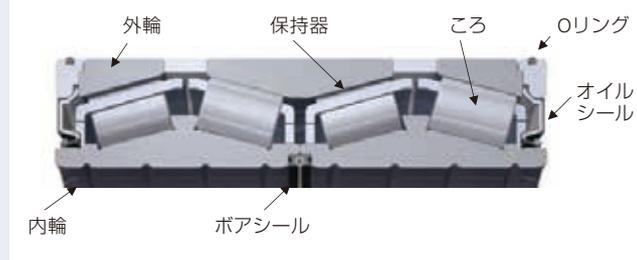


図 16 高負荷容量密封四列円すいころ軸受

Fig. 16 Extra-Capacity Sealed-Clean Four-Row Tapered Roller Bearing



図 17 水浸入下で早期損傷を抑制するグリース

Fig. 17 Grease to Prevent Premature Damage From Water Entry

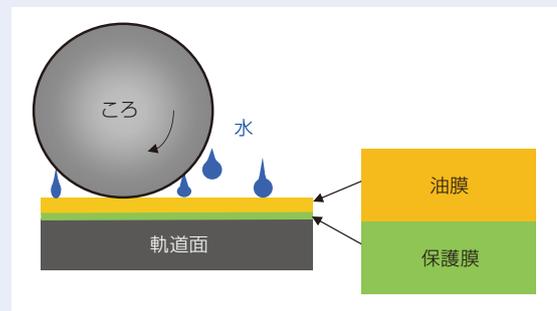


図 18 開発グリースの特徴

Fig. 18 Characteristics of Developed Grease

4.1.3 高速対応 WR 軸受の開発

近年、生産性を更に向上するため、圧延機の高速度化が各社で取り組まれている。特にブリキ鋼板などでは薄板製品用の圧延機において、超高速化（圧延速度 2 200 m/min. 以上）の対応ニーズがある。

従来の高速用途向け WR 軸受のオイルシールは耐熱性を有するフッ素系ゴムが使用されていた。しかし、超高速条件では、オイルシールリップ部の異常発熱により早期にリップ劣化が発生し、軸受内部に圧延水が浸入し焼付きなどの軸受損傷が確認されている。この対策として、PTFE（PolyTetraFluoroEthylene）樹脂をシールリップに一体成形させた特殊オイルシール（**図 19**）を採用した。さらに軸受内部の最適設計により軸受の低発熱化（軸受内部のころがり摩擦低減）を図った超高速用途向け密封四列円すいころ軸受を開発した。この軸受は実機試験にて温度測定を行い軸受の発熱低減効果及び長期間の高い密封性が確認されており、突発的な焼付きのリスクを低減している。

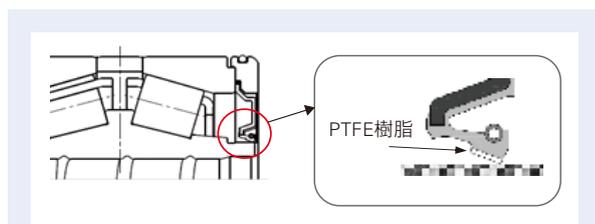


図 19 超高速用途向け PTFE 一体化シール
Fig. 19 Integrated PTFE Seal for Ultra High Speed Rolling Mill

4.2 多段圧延機用バックアップロール軸受の開発

多段圧延機は、主に電磁鋼板やステンレス鋼板など、硬く延びにくい鋼材を均一な厚みで圧延するために用いられている。近年、省エネ、脱炭素が重視される中、機械の電動化やハイブリットカー、電気自動車の増産が進められている。また新興地域のインフラ整備による発電所・変電所の増設などに伴い、電磁鋼板の需要が増加しており、高付加価値鋼板の生産能力を増強させるため、圧延荷重の増加、高速圧延化が進められ、軸受にも対応が求められてきた。

バックアップロール軸受に対しては高粘度の油が使用できるオイルミスト潤滑、また軸受内部への圧延水の浸入を防ぐため密封形式が採用された。

軸受シールには高速仕様に対応させるため低接触シールを採用した。しかし、オイルミストをシールリップから排気しながら所定の軸受内圧を保持して圧延水の浸入を阻止する相反機能が必要であった。

これを達成するため、シール排圧を最適化したシール仕様を確立し、同時にメンテナンス時のシール交換作業を容易な構造とした。さらに前述したスーパーTF 材の採用による多段圧延機用密封バックアップロール軸受を開発した（**図 20**）。

開発軸受は実機の使用において、長寿命化による設備の信頼性向上、廃却数の削減によるメンテナンスコスト削減に貢献している。

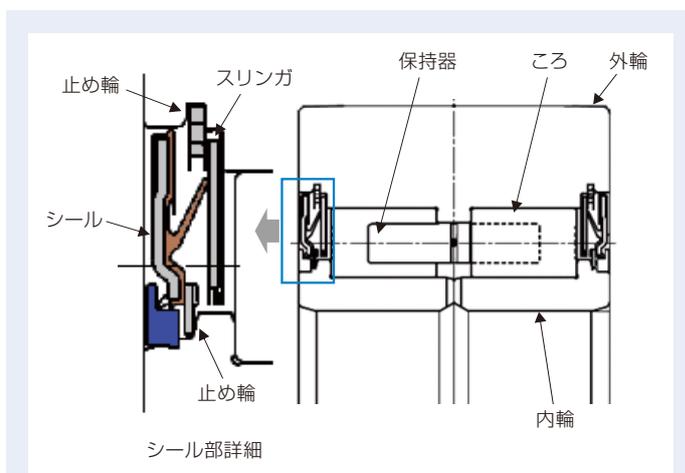


図 20 多段圧延機用密封バックアップロール軸受
Fig. 20 Sealed-Clean Bearing for Backup Rolls in Cluster Mills

4.3 特殊圧延機の使用条件過酷化への対応

製鉄メーカーは生産設備のスリム化・効率化を行うため、ラインの集約・統合化を進めている。その一例として圧延機を共通とし、従来と全く異なる寸法や形状の高付加価値製品を製造するケースが増加している。これにより従来よりも大きな圧延荷重が負荷される。

また、装置側の各寸法は統一化され、軸受の内輪・外輪・幅寸法に制約があるため、設備の荷重中心と軸受中心がズレ、偏心した状態で重荷重が負荷（オフセット荷重作用）され、軸受1列に基本定格荷重の100%を超える集中荷重が作用する場合もある。

当社ではこれに対応する非対称ころ軸受構造を開発した（図21）。このような過酷な負荷状態においても設計・熱処理・解析技術により、ユーザー要求を満足する仕様を確立させ設備の安定稼働に貢献している。

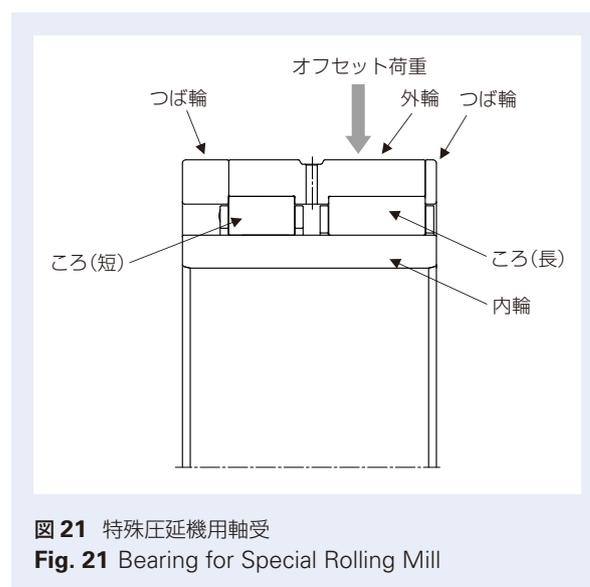


図 21 特殊圧延機用軸受
Fig. 21 Bearing for Special Rolling Mill

5. あとがき

以上、製鉄工程の主要設備に使用される近年の軸受技術動向について解説した。これまで製鉄ユーザー設備の生産性向上にフォーカスし、主要設備ごとの技術課題に対して高信頼性・長寿命軸受の開発を進めてきた。

今後は、カーボンニュートラル社会に向けて、軸受診断技術を応用した再利用ニーズや軸受製造におけるCO₂削減にも取り組む所存である。

参考文献

- 1) 野村剛 圧延設備用軸受の最新技術動向 月刊トライボロジ 2019.4
- 2) 大平隆昌 鉄鋼設備における軸受の技術動向
NSK Technical Journal, 678 (2005)
- 3) 鉄鋼・連続鑄造機ガイドロール自由側用長寿命・高機能円筒ころ軸受
NSK Technical Journal, 691 (2019)

歯科エアタービン QuickStopBearing™

岡崎 峰人*, 白井 幹子*



岡崎 峰人

QuickStopBearing™ for Dental Air Turbines

Y. Okazaki, M. Shirai



白井 幹子

The COVID-19 pandemic has increased awareness of the risk of healthcare-associated infections and drawn focus to the handling of medical devices that may come into contact with the human body. Bearings support rotation in all kinds of medical devices, and post-use cleaning, disinfecting, and sterilizing create challenges for stable operation over the long-term.

Here, we report on the QuickStopBearing for dental air turbines—handpieces used for drilling, cutting, and other dental treatments. Compared to conventional handpiece bearings, the newly developed QuickStopBearing has a revised bearing seal structure and a significantly shorter duration of inertial rotation. These features help improve treatment efficiency, extend service life, and reduce the risk of nosocomial infections by reducing the entry of foreign matter into the bearing.

1. まえがき
2. QuickStopBearing の特性
 - 2.1 エアタービンの構造
 - 2.2 QuickStopBearing の構造
 - 2.3 回転性能と惰性回転停止時間
 - 2.4 軸受密封性能
 - 2.5 耐オートクレーブ性能
3. あとがき

1. まえがき

近年、COVID-19の流行により院内感染リスクへの関心が高まり、特に人体に接触する可能性がある医療機器の取扱いには細心の注意が払われている。

その中には、軸受を使用した回転機器も多く、使用後には機器の洗浄、消毒、滅菌が必ず施されている。

本報では、このような背景から新たに開発した歯科医院で歯の切削・治療に使用されるエアタービン(写真1)

用 QuickStopBearing について報告する。

新開発の QuickStopBearing は従来の軸受密封構造を見直し、エアタービンの惰性回転停止時間を大幅に短縮し、歯科医院における治療効率の向上と患者の安全性の確保を実現している。また、軸受内への異物の侵入を低減することより、院内感染防止とエアタービンの長寿命化にも寄与している。

* E&E 軸受技術センター

2. QuickStopBearing の特性

2.1 エアタービンの構造

一般的なエアタービンに使用される軸受を図 1 に示す。内径φ3.175 mm、外径φ6.35 mm の深溝玉軸受やアンギュラ玉軸受が使われている。

エアタービンの洗浄、消毒、滅菌に対応するため内外輪には高耐食ステンレス鋼、玉はセラミック、保持器は PAI（ポリアミドイミド）、PEEK（ポリエーテルエーテルケトン）、PI（ポリイミド）、密封板にはオーステナイト系ステンレスを採用している。

一般的なエアタービンのヘッド部の構造を図 2 に示す。

エアタービンは給気エアにより軸受間に配置される羽根車を 40 万回転程度で回転させることにより、シャフト先端に取り付けられた切削バーでスムーズに歯を削る構造となっている。

エアタービンを回転させる給気エアは羽根車を駆動させた後、エアタービン内を通りチェアユニットに排気エアとして回収されるが、一部のエアは軸受内を通過しヘッド部上下から排出される。（図 3）



写真 1 歯科用エアタービン
Photo 1 Dental air turbine

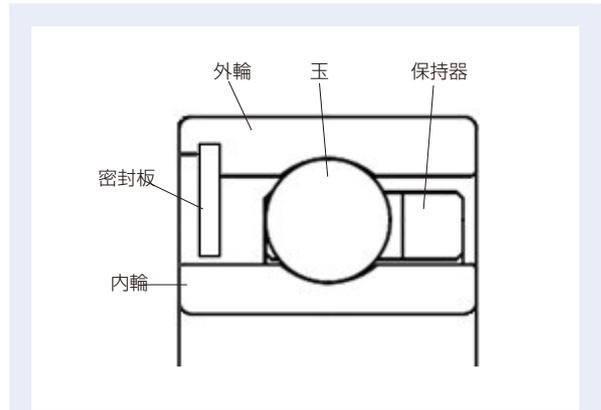


図 1 一般的なエアタービン用軸受と断面図

Fig. 1 Cross-section of standard bearing for dental air turbines

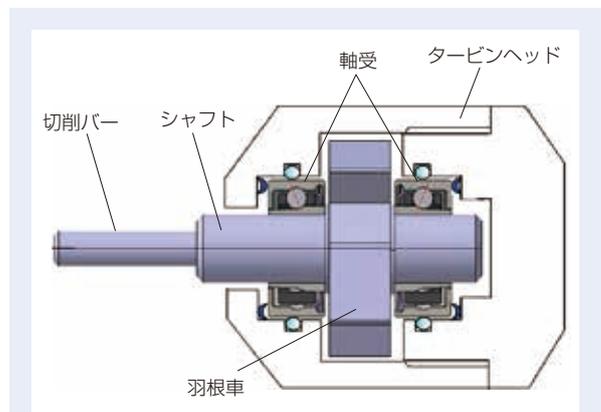


図 2 エアタービンヘッドの断面図

Fig. 2 Cross-section of air turbine head

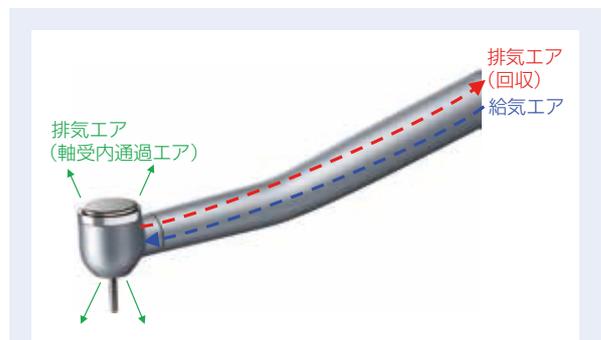


図 3 エアタービンの給気エアと排出エア

Fig. 3 Air turbine supply air and exhaust air

2.2 QuickStopBearing の構造

QuickStopBearing の外観と構造を写真 2、図 4 に示す。

QuickStopBearing は、軸受外輪のシール溝に芯金の無いゴムシールが挿入され、金属の止め輪によりゴムシールが固定されている。

ゴムシールの内径部は内輪外径の傾斜部に軽く接触しており、給気エアによるエアタービン回転時にはゴムシール内径部が軸受内を通過するエアにより一定量浮上し、規定の回転数を確保する。

一方、給気エアを停止すると、ゴムの弾性によりシール内径部が瞬時に戻り、内輪外径傾斜部に接触することによって短時間で惰性回転が停止する構造となっている。(図 5)

2.3 回転性能と惰性回転停止時間

歯科医は患者の安全確保のため、治療に際しては回転が完全に停止してから口腔内よりエアタービンを取り出すことが必要である。従来のエアタービンは、給気エア停止後に数秒間(2～5秒程度)の惰性回転時間があり、この間は口腔内からエアタービンを取り出すことができないため歯科医の治療効率を妨げる一因となっていた。



写真 2 QuickStopBearing
Photo 2 QuickStopBearing

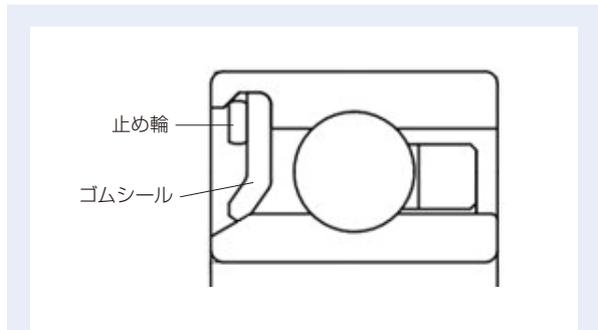


図 4 QuickStopBearing 断面図
Fig. 4 Cross-section of the QuickStopBearing

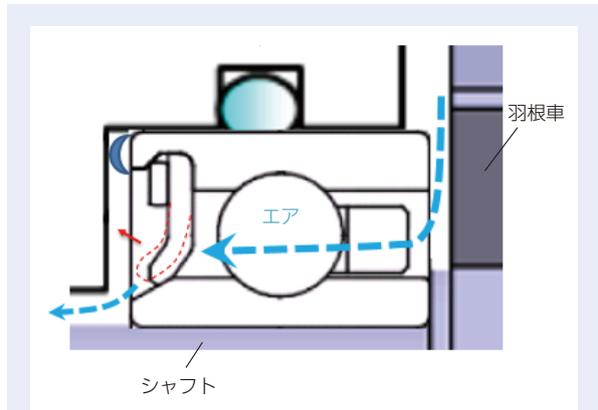


図 5 軸受内通過エアとシールの動き
Fig. 5 Seal movement from airflow through bearing

図6に従来軸受と QuickStopBearing をそれぞれ組込んだエアタービンにおける給気エア停止から惰性回転が停止するまでの時間データを示す。

従来軸受（赤線）はなだらかに回転数が低下する（惰性回転する）のに対し、QuickStopBearing（緑線）は短時間で回転数が低下している。

QuickStopBearing は、エア停止後概ね1秒以下の回転停止時間を達成する一方で、治療効率に影響するエアタービンの定格回転数も規定の回転数が確保されている。

2.4 軸受密封性能

2.4.1 回転停止時間と吸込み防止（サックバック防止）

図3に示すように一般的なエアタービンでは、回転中に軸受を通過したエアがヘッド部上下のすきまより一定量排出されている。

給気エア停止時には、図7に示すようにヘッド上下のすきまからヘッド周辺の口腔内異物（唾液、歯の切削粉、血液など）がヘッド内に吸い込まれるサックバックと呼ばれる現象が発生し、タービンヘッド内に侵入した感染物質による院内感染や異物侵入による軸受寿命の低下などが懸念される。

これまでのエアタービンメーカーによるサックバック現象の低減策としては以下が挙げられる。

- ・エアタービンヘッド内にブレーキ構造を設け惰性回転停止時間の短縮を実現する
- ・複雑なラビリンス構造を設ける
- ・回転停止時にチェアユニットからの供給エアを微細にコントロールする

これらの対策によりタービンヘッド内の構造もしくはチェアユニットの制御が複雑になることが課題となっている。

図8にサックバック現象を確認するための試験設備構造を示す。アクリルケース内にエアタービンを取付け、ケース内の気圧を測定する圧力センサを配置している。圧力センサの信号はオシロスコープで経時的に確認できるようになっている。また、ケース外の水槽に伸びるチューブによって、ケース内の圧力が大気圧より低くなった場合（負圧状態）には、チューブ内で水が吸い上げられる様子を目視確認できるようになっている。

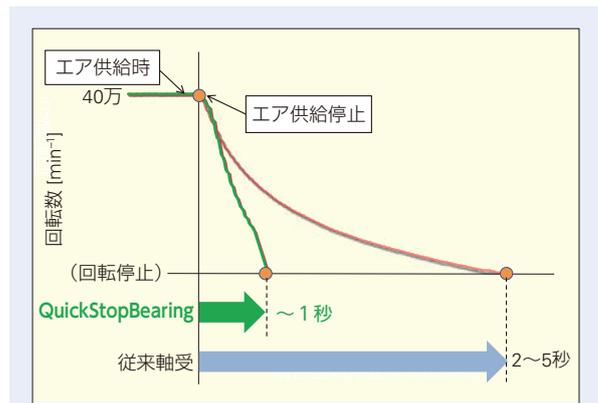


図6 従来軸受と QuickStopBearing の惰性回転停止時間

Fig. 6 Duration until inertial rotation stops in conventional bearings and the QuickStopBearing

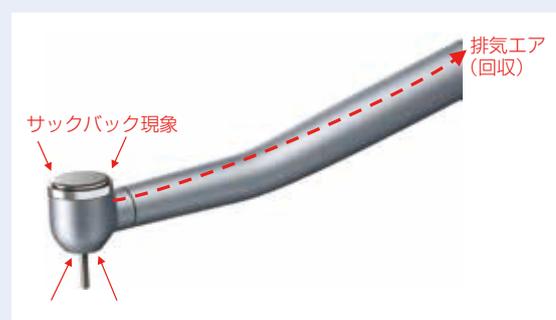


図7 エアタービンのサックバック現象

Fig. 7 Suckback phenomenon in an air turbine

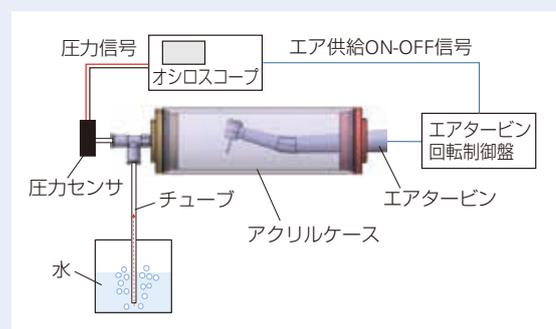


図8 エアタービンのサックバック現象試験装置

Fig. 8 Equipment to test air turbine suckback

図9に従来の軸受を使用したエアタービンとQuickStopBearingを使用したエアタービンのアクリルケース内の気圧変化を比較した試験結果を示す。

一般的な軸受を使用したエアタービン（赤線）は、給気エア停止後、アクリルケース内が急激に負圧状態となり徐々に大気圧に戻っている。また、チューブ内に顕著な水の吸い上げも確認されたことから、タービンヘッド部にサックバック現象が発生していることが確認された。

これに対しQuickStopBearingを使用したエアタービン（緑線）は、給気エア停止後、アクリルケース内が負圧状態になることはなく、徐々に常圧に戻る。そのためチューブ内において水の吸い上げは確認されなかった。

これらの結果から、QuickStopBearingにより、給気エア停止時のサックバック現象を低減、防止する効果が確認された。

2.4.2 クイックストップゴムシールの耐摩耗性能

QuickStopBearingは、惰性回転停止時間の短縮とサックバック防止機能をゴムシール内径部と内輪外径傾斜部の接触により実現している。

このため、ゴムシール内径部が経時的に摩耗することによる性能劣化が懸念されるため、ゴムシールの耐摩耗試験（ゴムシール開閉試験）を実施し、その結果を図10に示す。

試験はエアタービンの回転と停止を繰り返し、シール開閉を100万回実施したが、ゴムシール内径接触部には摩耗が一切確認されなかった。

これは回転停止までの接触時間が極短時間であることに加え、ゴムシールおよび内輪接触部の最適設計を行ったことによるもので、実使用に際して十分な耐摩耗性を実現した。

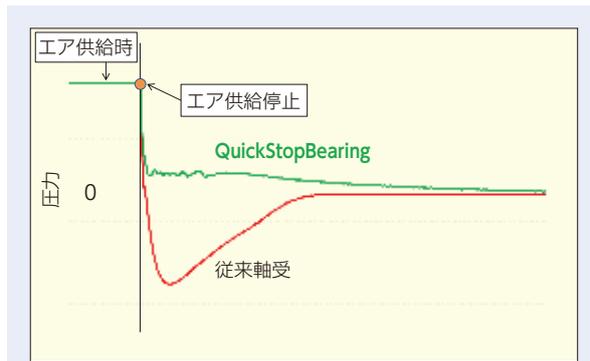


図9 従来軸受とクイックストップ軸受のサックバック試験結果

Fig. 9 Suckback test results for conventional bearings and the QuickStopBearing

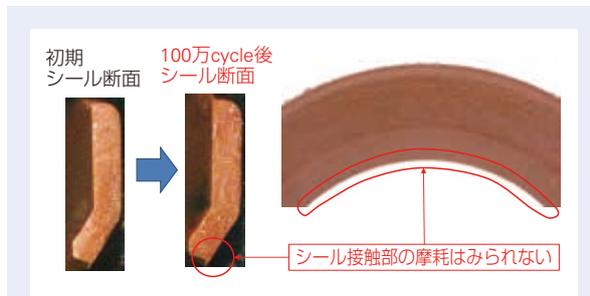


図10 クイックストップ軸受のゴムシール耐摩耗試験（ゴムシール開閉試験）の結果

Fig. 10 Test results for rubber seal wear resistance (rubber seal opening / closing test)

2.5 耐オートクレーブ性能

エアタービンには図 11 に示すように、治療後に洗浄、消毒、注油、滅菌の処理を経て次の治療に使用される。

この中で滅菌(オートクレーブ)は高温、高圧水蒸気の条件となるため軸受の性能を劣化させることが確認されている。

特にゴムシールは高温、高圧水蒸気下における物性の劣化が確認されているため、QuickStopBearing の惰性回転停止時間や回転数確保、サックバック防止などの性能の低下が懸念される。そのため、QuickStopBearing のシールには耐熱性、耐水性に優れた高機能ゴム材料を採用することとした。

図 12 に QuickStopBearing における滅菌回数毎の回転数と回転停止時間の変化の結果を示す。

滅菌回数 250 回まで確認した結果、エアタービンの回転数の低下は 10 %以下、惰性回転停止時間は 2 秒以下を達成したことから、オートクレーブによる性能の低下は、実使用上において影響ないことが確認された。

3. あとがき

本報では、新開発の歯科エアタービン用 QuickStop Bearing の構造や性能について報告した。

今後も軸受を使用した医療用回転機器における要求機能も厳しさを増していくことが予想され、引き続きユーザーの更なる要求に応えるべく、軸受の高機能化開発を進めていく。

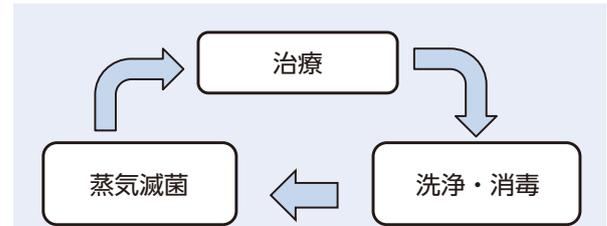


図 11 歯科医院でのエアタービンの使われ方
Fig. 11 Usage cycle for air turbines at dental clinics

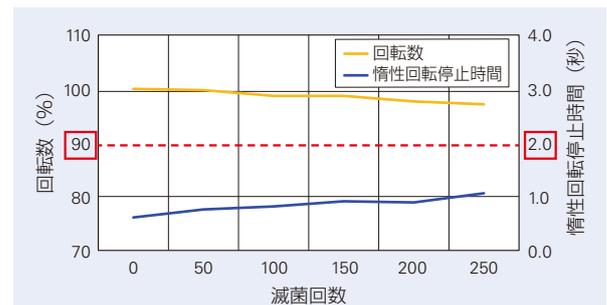


図 12 オートクレーブ試験結果(回転数, 惰性回転停止時間)
Fig. 12 Autoclave test results (Rotation speed, inertial rotation stop time)

電気インピーダンス法によるボールねじ・ リニアガイドの潤滑状態評価

青山 樹林*, 筒井 燦*



青山 樹林

Evaluation of Lubrication Performance in Ball Screws & Linear Guides by the Electrical Impedance Method (EIM)

J. Aoyama, A. Tsutsui



筒井 燦

Applying the electrical impedance method (EIM) to ball screws and linear guides allows for the measurement of oil-film thickness and metal contact ratio along with broad evaluations of lubrication performance inside the actual product, a feat that was difficult until now.

Wiring inductance is greatly influenced by the characteristics of reciprocating motion, but by correcting for these in calculations, we upgraded conventional EIM and improved measurement accuracy.

In addition, we propose a simple method to evaluate oil-film thickness and metal contact ratio using the reciprocal of reactance and resistance per contact point. This helps to improve EIM and its convenience.

We evaluated lubrication performance inside actual products with various lubricants, surface properties, and operating conditions and expect the improved EIM to be useful in extensive future applications.

- | | |
|---|---|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. まえがき 2. 測定原理 3. ボールねじによる潤滑状態評価方法の確立 <ol style="list-style-type: none"> 3.1 試験方法 3.2 測定例 3.3 配線インダクタンス補正と簡易評価手法 | <ol style="list-style-type: none"> 4. ボールねじの評価結果 <ol style="list-style-type: none"> 4.1 各種グリース 4.2 高精度・長寿命ボールねじ 5. リニアガイドの潤滑状態評価 <ol style="list-style-type: none"> 5.1 試験方法 5.2 測定例 5.3 微小揺動運転 6. あとがき |
|---|---|

1. まえがき

ボールねじならびにリニアガイドは、機械の精密送り機構要素として、高精度で高品質な製品の生産にとって重要な要素部品となるなど、幅広い用途に使用されており、より一層の信頼性向上、長寿命化が求められる。そのためには内部の適切な潤滑が必要となるが、潤滑状態の指標となる油膜厚さは、一般的には光干渉法のように、光を透過する材質を用いた場合に測定可能となることから、実際の製品内部の油膜厚さを

測定することは困難であった。

ボールねじやリニアガイドにおいては、簡易的な潤滑状態評価方法として動トルク測定や動摩擦力測定を行い、Stribeck 曲線を作成する方法もあるが、これらはかくはん抵抗、転がり粘性抵抗、すべり摩擦抵抗に代表される様々な抵抗の合計となっており、潤滑状態を定量的に判断するのは難しいのが実情である。

電気インピーダンス法¹⁾は、転がり軸受など金属で

* 直動技術センター，試験研究部

構成された実際の機械要素に対し、高周波の交流電圧を印加することで、EHD 接触域の油膜厚さおよび金属接触割合を測定可能とする。今回、軸受において開発の進められた電気インピーダンス法をボールねじやリニアガイドに適用し、その潤滑特性を広く評価したので紹介する。

2. 測定原理

鋼球を軌道溝に接触させた際の物理モデル図を図 1 に示す。ただし、図 1 は鋼球の一部が溝に接触している様子、つまり混合潤滑におけるモデル図である。ここで、 r ：鋼球半径、 a ：ヘルツ接触半径、 S ：ヘルツ接触面積、 $h(x)$ ：座標 x における油膜厚さ、 h_1 ：EHD 接触域で油膜が形成されている領域における油膜厚さ、 h_2 ：EHD 接触域の周辺域における最大油膜厚さ、 α ：金属接触割合(油膜の破断率)である¹⁾²⁾。

また、転がり軸受要素内部の等価回路図について図 2 に示す。ただし、 R_1 ：EHD 接触域内の油膜が破断している領域に生じる抵抗、 C_1 ：EHD 接触域内の油膜を形成している領域に生じるコンデンサ、 C_2 ：EHD 接触域以外の領域に生じるコンデンサである²⁾。また、ボールねじやリニアガイドは往復運動をする特性上、測定機器への配線が長くなるため、そこに内在するコイル成分を考慮した。 L_E は配線の自己インダクタンスであり、概ね数 μH 程度となる。

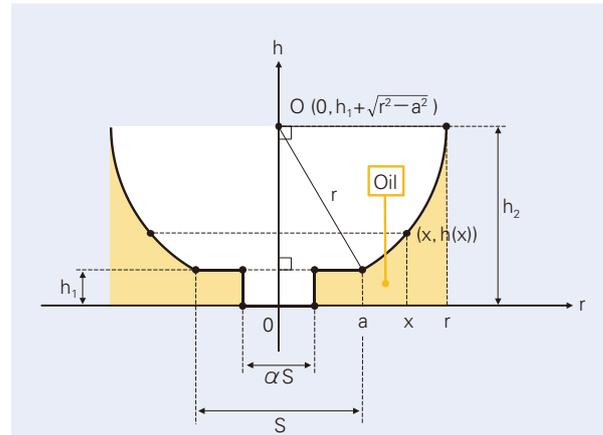


図 1 物理モデル図
Fig. 1 Geometrical model of EHD point contact

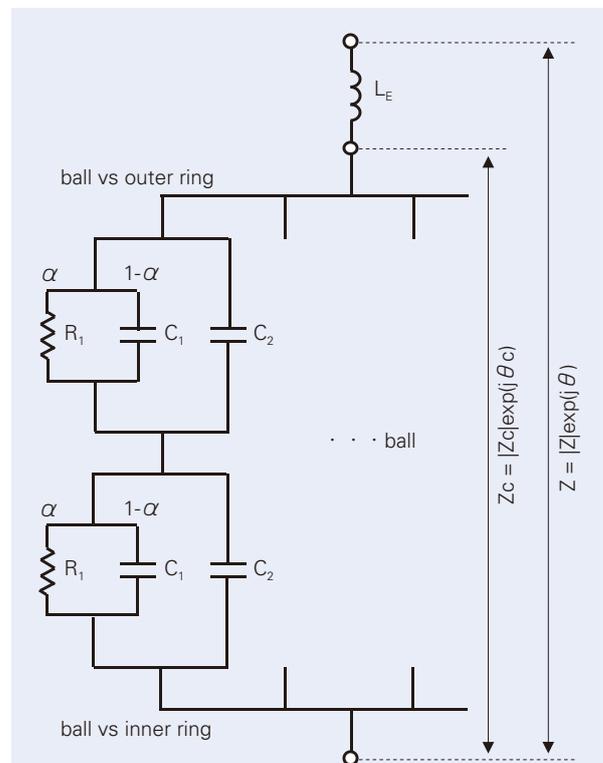


図 2 等価電気回路
Fig. 2 Equivalent electrical circuit

3. ボールねじによる潤滑状態評価方法の確立

3.1 試験方法

本試験で用いたボールねじ試験機の模式図を図3に示す。本試験ではねじ軸径φ 25 mm, リード 10 mm, 鋼球径φ 3.175 mmのボールねじを使用した。適切な電気回路を構成するために、ボールねじは樹脂などの絶縁治具を介して駆動モータや機台に接続した。またLCRメータへは、ナットには直接配線し、ねじ軸はカーボンブラシを用いて接続した。この状態で各運転速度での試験系のインピーダンスZならびに位相θを測定し、平均油膜厚さならびに金属接触割合を算出した。

潤滑剤は表1の性状の物を使用し、比較評価を行った。

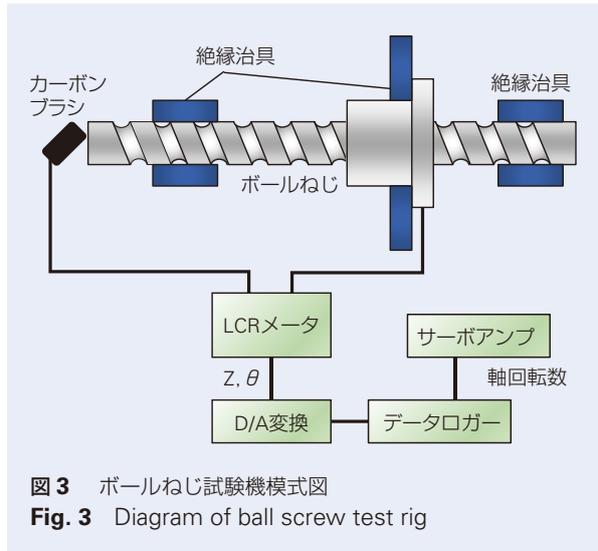


図3 ボールねじ試験機模式図
Fig. 3 Diagram of ball screw test rig

表1 潤滑剤の性状

Table 1 Traits of lubricants

潤滑剤	VG68 油	A グリース	L グリース	N グリース
用途	汎用多目的	汎用 高荷重用	高速 中荷重用	耐フレッチング用
増ちょう剤	—	Li 石けん	Li 石けん	ウレア
基油	パラフィン系	鉱油	POE	PAO
動粘度 @40 °C [mm ² /s]	68	130	29	26

3.2 測定例

図4に、標準品ボールねじ、VG68油潤滑下での、軸回転数1から1000 min^{-1} における複素インピーダンス測定結果を示す。回転数が高くなるほど、Zは大きくなり、 θ は -90° に近付いていく結果が得られた。この測定値を油膜厚さhならびに金属接触割合 α へ換算した結果を図5に示す。ただし、破線はHamrock-Dowson式による概算理論油膜厚さである。両対数グラフにおいて、油膜厚さは理論値の傾きに非常に近くなったが、その大きさは理論値の半分程度となり、また、50 min^{-1} 未満では油膜厚さが換算できなくなった。金属接触割合は、10 min^{-1} 以下の低速条件において上限値の1を大きく超えるという、理にかなわない値を示した。

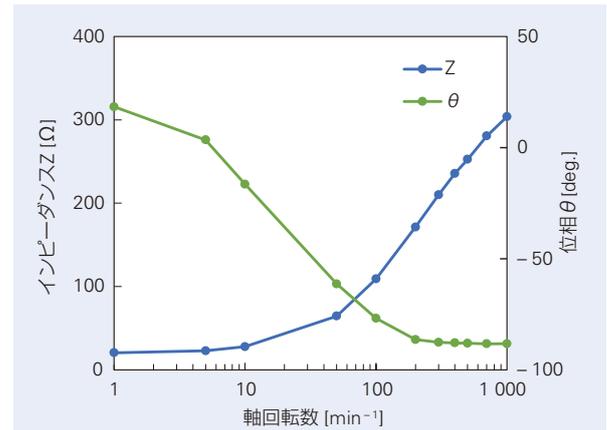


図4 複素インピーダンス測定結果(VG68油)
 Fig. 4 Result of complex impedance measurement (VG68 oil)

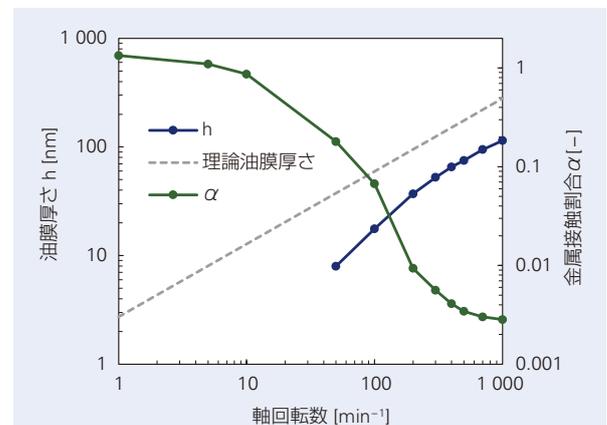


図5 油膜厚さと金属接触割合
 Fig. 5 Oil film thickness and metal contact ratio

3.3 配線インダクタンス補正と簡易評価手法

そこで、配線のコイル成分の影響に着目した。図2に示すZは配線のインダクタンスを含むが、キルヒホッフ則に基づいてこれを補正したZcを求め、Zc, θ_c を用いて油膜厚さ、金属接触割合を求めた結果を図6に示す。油膜厚さは 1 min^{-1} まで算出でき、金属接触割合は低速条件においても0.6程度と、理にかなう値の範囲に収まった。

併せて、キルヒホッフ則に基づいて1接触点あたりのリアクタンスC, 抵抗Rを算出し、それらの逆数 $1/C$, $1/R$ を簡易評価手法として示した結果を図7に示す。 $1/R$ は金属接触割合と比例し、 $1/C$ は油膜厚さとよく相関するパラメータとなるが、溝寸法や潤滑剤物性値が不明な場合など、油膜厚さが算出できないような条件において、潤滑状態を相対的に評価することが可能となる。実際に、図6と図7はよく対応しており、 $1/C$, $1/R$ が油膜厚さと金属接触割合をある程度代用できることを示している。

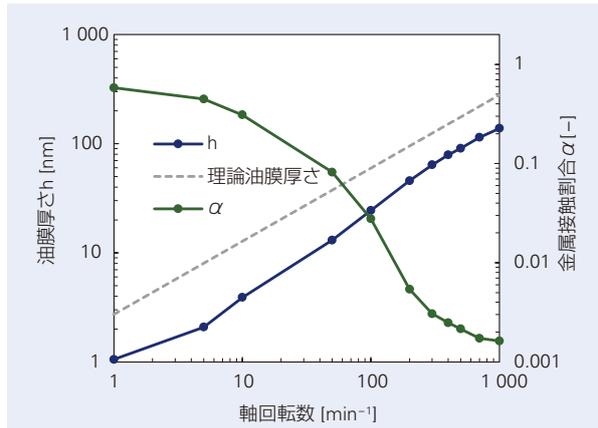


図6 インダクタンス補正後の油膜厚さと金属接触割合
Fig. 6 Oil film thickness and metal contact ratio after correction for inductance

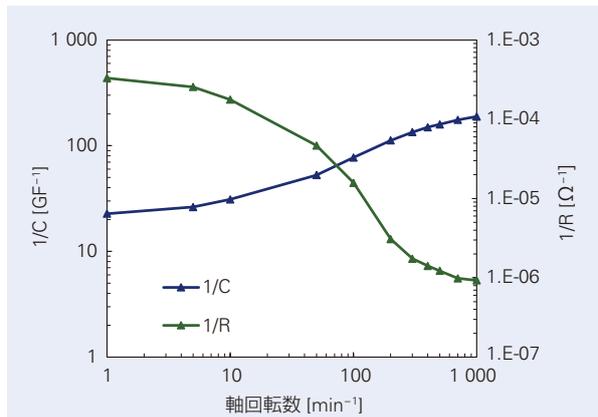


図7 簡易評価手法
Fig. 7 Simple evaluation of oil film thickness and metal contact ratio

4. ボールねじの評価結果

4.1 各種グリース

直動製品に使用されるグリースは、使用温度や速度、荷重条件を考慮して選定される。例えば油膜が形成されにくい低速運転や高荷重用途には、表1のAグリースのような高基油粘度グリースが用いられ、温度上昇が大きくなる高速運転用途には、Lグリースのように、基油動粘度が低めのグリースが用いられる。また、揺動運転など特殊な用途には、それに対応したグリースが用いられる。

今回、汎用高荷重用であるAグリースと、高速中荷重用であるLグリースについて電気インピーダンス法で潤滑特性を比較評価し、実際の潤滑状態を確認した。

2種類のグリースについて比較評価した結果を図8（油膜厚さ）、図9（金属接触割合）に示す。ただし、図8の破線は各グリースの25℃の基油動粘度に基づいた概算理論油膜厚さである。100 min^{-1} 以上の速度域においては、AグリースとLグリースの油膜厚さは理論値に近い値を示した。一方で100 min^{-1} 未満の速度域においては、Lグリースは速度が遅くなるにつれて油膜厚さが増大するという、理論値とはかけ離れた結果を示しており、低速条件における油膜の保持性について興味深い現象を示唆するものとなっている。金属接触割合は、Aグリースは100 min^{-1} を境に低速では大きく上昇したが、Lグリースは1 min^{-1} の超低速においても低い値を維持する結果となった。

Lグリースの低速条件における潤滑特性は、Hamrock-Dowson式による理論油膜厚さに対して大きく上振れする結果となっている。従来、低速で使用される製品に対しては油膜を保持するために高粘度の潤滑剤を適用することが一般的であったが、基油動粘度が低いにも関わらず低速で油膜厚さを維持できるという結果は、低速で使用される製品にLグリースを適用することで、製品の低トルク化が実現できる可能性を示唆するものである。

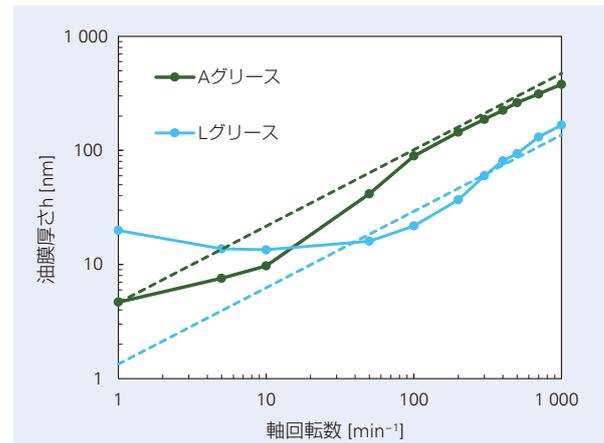


図8 グリース潤滑下の油膜厚さ

Fig. 8 Oil film thickness of grease lubrication

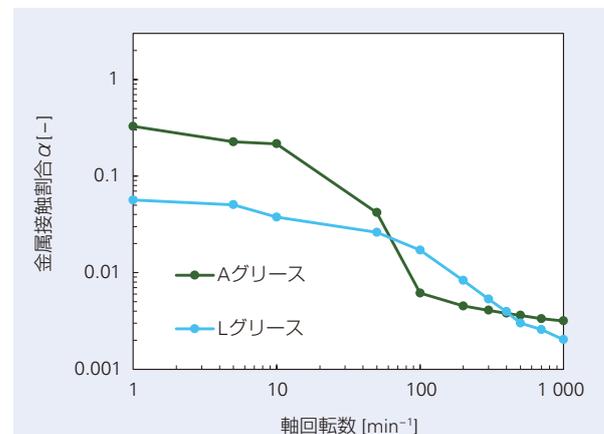


図9 グリース潤滑下の金属接触割合

Fig. 9 Metal contact ratio of grease lubrication

4.2 高精度・長寿命ボールねじ

ボールねじは、低速条件で長時間使用すると軌道溝の摩耗によって予圧の低下が生じ、送り精度の維持に問題が発生しがちであった。高精度・長寿命ボールねじは、NSK独自の表面改質技術により摩耗を抑制し、送り精度を長期間維持することに成功している。

高精度・長寿命ボールねじの軌道溝には、無数の微小なディンプルが形成されており、それが油だまりとしての効果を発揮して油膜形成能力を向上していると考えられている。今回、電気インピーダンス法によってその潤滑特性を比較評価し、効果を検証した。

高精度・長寿命ボールねじのVG68油潤滑下での油膜厚さを図10に、金属接触割合を図11に示す。高精度・長寿命ボールねじの油膜厚さは、高速条件においては標準品と同等だが、 100 min^{-1} 以下の低速条件では標準品よりも厚く、金属接触割合も低い結果となり、油膜形成能力の高さを示している。

VG68油潤滑下において、 50 min^{-1} を基準とした動トルク上昇量の比較測定結果を図12に示す。高精度・長寿命ボールねじは 10 min^{-1} 以下の低速条件において動トルク上昇量が標準品よりも小さい。これは、低速条件での油膜保持により金属接触割合が低く抑えられたことを示しており、表面改質の効果が確認された。一方、 200 min^{-1} 以上の中～高速条件においても高精度・長寿命ボールねじの動トルク上昇量は標準品よりも低い。この速度域における潤滑特性については、油膜厚さや金属接触割合の測定からは、トルクを低減するような結果が得られていないため、別の特性に起因した現象である可能性が考えられ、今後の課題である。

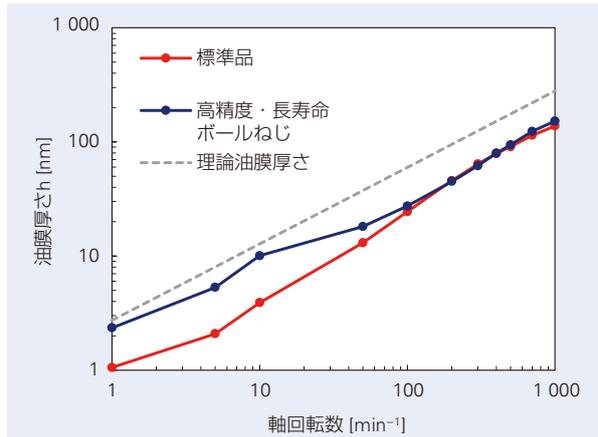


図10 高精度・長寿命ボールねじの油膜厚さ (VG68油)
Fig. 10 Oil film thickness of high-precision ball screw (VG68 oil)

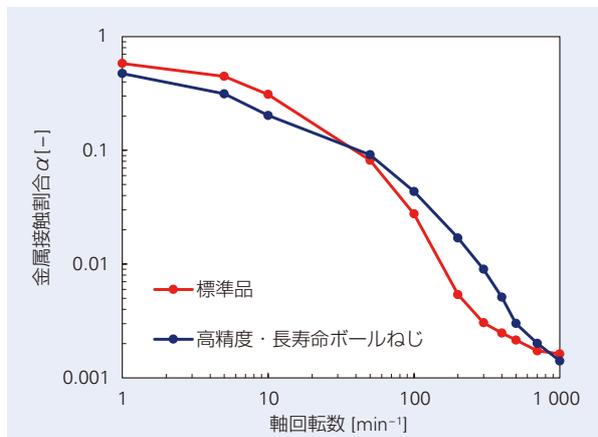


図11 高精度・長寿命ボールねじの金属接触割合 (VG68油)
Fig. 11 Metal contact ratio of high-precision ball screw (VG68 oil)

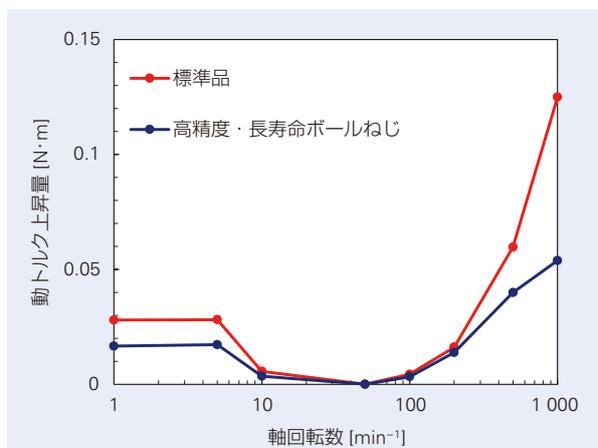


図12 高精度・長寿命ボールねじの動トルク上昇量 (VG68油)
Fig. 12 Dynamic torque rise of high-precision ball screw (VG68 oil)

5. リニアガイドの潤滑状態評価

5.1 試験方法

本試験で用いたリニアガイド試験機の模式図を図 13 に示す。本試験ではサイズ 25（鋼球径 ϕ 4.76 mm）のリニアガイドを使用した。適切な電気回路を構成するために、リニアガイドは樹脂などの絶縁治具を介して駆動系や機台に接続した。また LCR メータへは、レールとスライダに直接配線して接続した。この状態で各運転速度での試験系のインピーダンス Z ならびに位相 θ を測定し、平均油膜厚さならびに金属接触割合を算出した。

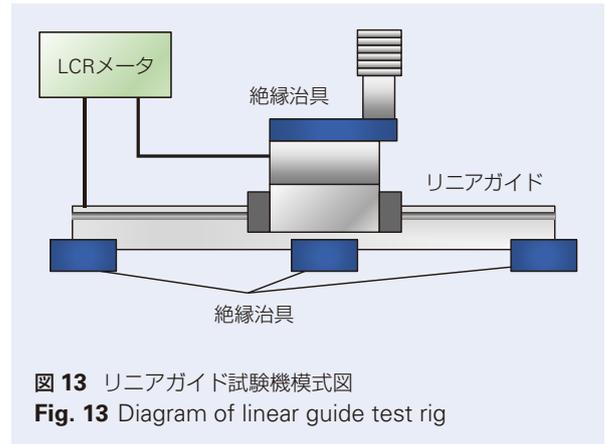


図 13 リニアガイド試験機模式図
Fig. 13 Diagram of linear guide test rig

5.2 測定例

リニアガイドの VG68 油での油膜厚さ、金属接触割合の評価結果を図 14 に示す。また、簡易評価 $1/C$ 、 $1/R$ を図 15 に示す。リニアガイドではスライダ送り速度 40 m/min 以下で理論油膜厚さからの乖離が大きくなり、 $1/C$ の推移に表されるように、低速条件において油膜厚さが非常に薄くなる結果となった。リニアガイドは送り速度に対するボール速度がボールねじよりも非常に遅いため、低速での油膜形成が難しくなっていると推察される。

また、汎用高荷重用である A グリースと、耐フレッチング用である N グリースについて $1/C$ を比較評価した結果を図 16 に示す。N グリースは基油動粘度が低いものの、20 m/min 以下の低速条件において $1/C$ がサチレートすることから、低速における油膜形成能力が高いことが分かる。

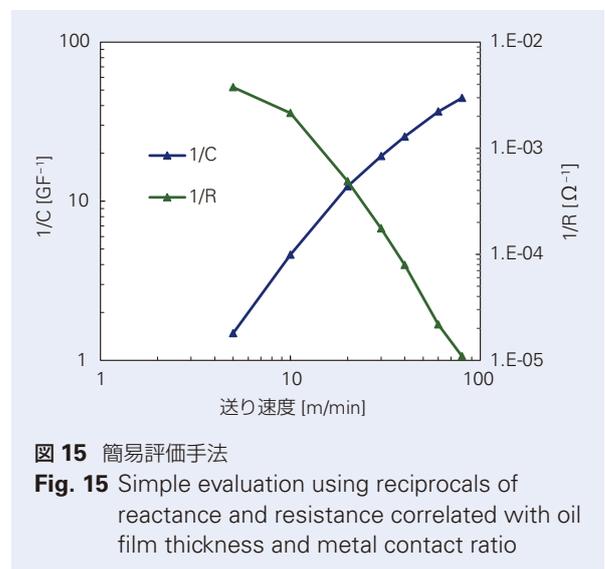


図 15 簡易評価手法
Fig. 15 Simple evaluation using reciprocals of reactance and resistance correlated with oil film thickness and metal contact ratio

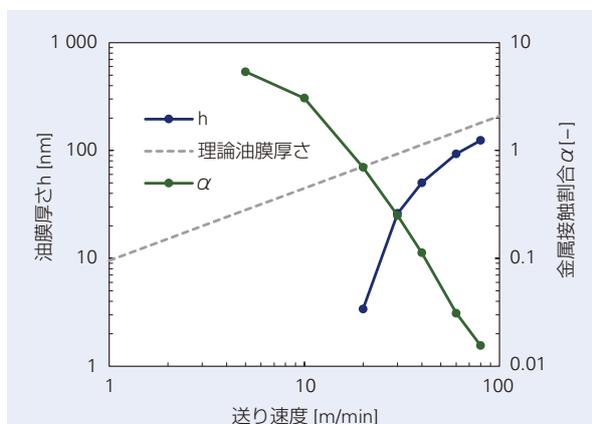


図 14 油膜厚さと金属接触割合
Fig. 14 Oil film thickness and metal contact ratio

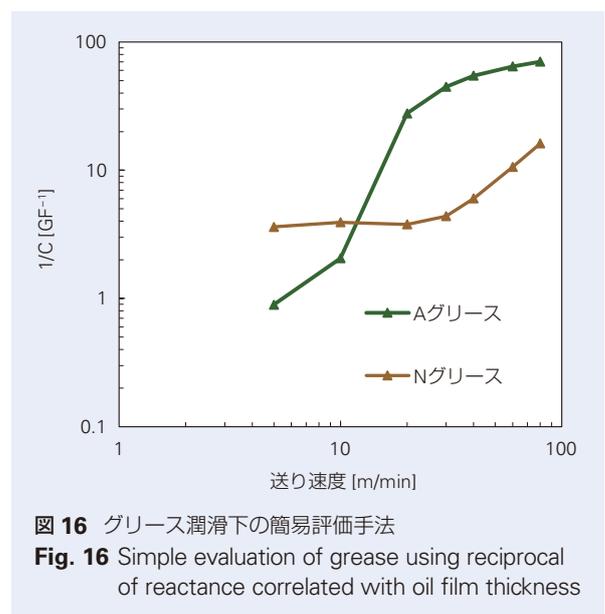


図 16 グリース潤滑下の簡易評価手法
Fig. 16 Simple evaluation of grease using reciprocal of reactance correlated with oil film thickness

5.3 微小揺動運転

リニアガイドでは微小なストロークで揺動運転させた場合に軌道溝にフレッチングが発生しやすく、送り精度の低下や異音などの問題を生じることがある。耐フレッチング用である N グリースの揺動運転下での性能は確固たるものではあるが、電気インピーダンス法の活用によって揺動運転時の油膜形成能力について実際に観察を行った。

リニアガイドを微小なストロークで揺動運転させた際の油膜厚さの簡易評価 $1/C$ の結果を図 17 に示す。ただし、潤滑剤は A グリースならびに N グリースであり、横軸はストロークを鋼球径で除した値としている。N グリースは A グリースと比較して基油動粘度が格段に低いが、ストロークが鋼球径の 10 倍程度の条件においては A グリースと同等の油膜厚さを維持する結果となった。また、鋼球径の 5 倍以下のストロークにおいては、A グリースはストロークが短くなるほど油膜厚さの簡易評価 $1/C$ が低下していくが、N グリースは対照的に鋼球径の 4 倍において $1/C$ が最も高くなり、鋼球径の 1 倍までは同程度の水準を維持できている。

鋼球径の 2 倍のストロークにおいて 10 000 サイクルの微小揺動運転を行った際の、油膜厚さの簡易評価 $1/C$ の推移を図 18 に示す。N グリースの $1/C$ は A グリースに対して 10 倍以上の値で安定する結果となり、N グリースの微小揺動運転下における優れた潤滑特性を裏付けるものとなった。

6. あとがき

ボールねじ、リニアガイドではこれまで、動トルク測定や動摩擦測定などの代用的な手法によって潤滑特性を評価してきたが、電気インピーダンス法を適用することで、製品内部の潤滑状態を詳細に評価することが可能となり、様々な潤滑剤や表面性状、運転条件における潤滑特性について新たな知見を得ることに成功した。

これらの知見を活かすことにより、送り系の状態監視技術を確立していくと共に、潤滑仕様の最適化によって環境負荷の低減、ひいてはカーボンニュートラル社会の構築に貢献していく。

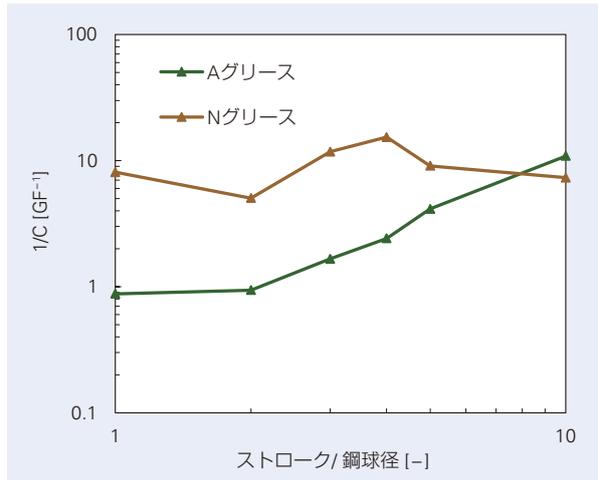


図 17 微小揺動運転下の $1/C$
Fig. 17 Reciprocal of reactance ($1/C$) under micro-oscillatory operation

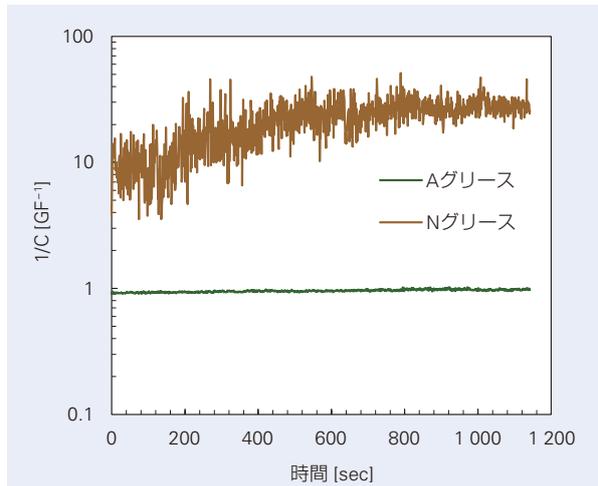


図 18 微小揺動運転下の $1/C$ の推移 (鋼球径の 2 倍ストローク)
Fig. 18 Reciprocal of reactance ($1/C$) over time under micro-oscillatory operation (stroke 2x ball diameter)

参考文献

- 丸山泰右, “転がり軸受の潤滑状態モニタリングに関する研究—電気インピーダンス法の開発—”, 学位論文.
- 前田成志, 丸山泰右, 中野健, “EHD 接触における膜厚と破断率の同時測定—インピーダンス法の検証”, NSK テクニカルジャーナル, 691 (2019) 74-76.

NSK VIRTUAL EXPO



矢野 吉章*

矢野 吉章

NSK VIRTUAL EXPO

Y. Yano

In 2020, the COVID-19 pandemic made face-to-face business and technical exchanges difficult. Therefore, in January 2021, we held “NSK VIRTUAL EXPO”, a web exhibition to introduce newly developed products and technologies from NSK to our customers.

In addition to online seminars with chat capabilities, we posted videos, explanations, and technical data to detail new products and technologies.

After the session, the site was revised and updated to become permanent. Using the site, we continue to hold online business and technical exchange meetings equivalent to those before the pandemic.

Here, we will provide an outline of the “NSK VIRTUAL EXPO” site.

1. まえがき
2. NSK VIRTUAL EXPO とは？
 - 2.1 概要
 - 2.2 カテゴリ
 - 2.3 新製品および新技術紹介ページ
3. あとがき

1. まえがき

NSKでは、自社初となるWEB展示会「NSK VIRTUAL EXPO」を2021年1月から2月にかけて開催した。そこでは、工作機械部門を対象とした新製品や新技術の動画、説明文、技術データの掲載ほか、NSK技術者によるオンラインセミナーを開催し、リアルタイムチャット形式によるお客様との質疑応答を実施した。

会期終了後には、NSKホームページ常設サイトに移設した。これにより、お客様とのオンライン商談、技術交流会の開催に繋がっている。

本稿では、「NSK VIRTUAL EXPO」の概要と利用方法を紹介する。是非、本サイトをご活用いただきたい。

また、本サイトの技術情報は随時更新を重ねている。

* 産業機械総合開発センター、直動技術センター、LG 技術部

2. NSK VIRTUAL EXPO とは？

2.1 概要

図 1 に「NSK VIRTUAL EXPO」のサイトロゴ、トップページの URL および 2 次元バーコードを示し、図 2 にスマートフォンで開いたトップページを示す。

「NSK VIRTUAL EXPO」は工作機械部門を対象とし、NSK が開発した軸受、スピンドル、ボールねじ、NSK リニアガイド、また、状態監視技術を含めた新製品や新技術の WEB 展示会である。図 3 に示すように NSK の 4 コアテクノロジーである「トライボロジー」「材料技術」「解析技術」「メカトロ技術」とこれらのコアテクノロジーを形にする生産技術を結集して製作した技術デモンストレーションも動画を活用し分かりやすく解説している。また、NSK の事業紹介動画の掲載や、図 4 に示すように YouTube の NSK Motion And Control チャンネルにもリンクしている。

常設展示であり、入場登録は不要である。また、言語は日本語・英語・中国語の 3 か国語に対応している。

2.2 カテゴリ

図 5 に「NSK VIRTUAL EXPO」トップビューを示す。左から状態監視技術、ボールねじ、精密転がり軸受、NSK リニアガイド、動画集の 5 つのカテゴリを用意している。対象カテゴリを選択すると、それぞれの製品群のページに遷移する。

図 6 に掲載例として精密転がり軸受とボールねじの製品群(抜粋)を示す。



図 1 NSK VIRTUAL EXPO サイトロゴ, URL, 2次元バーコード

Fig. 1 NSK VIRTUAL EXPO site logo, URL, and 2D barcode

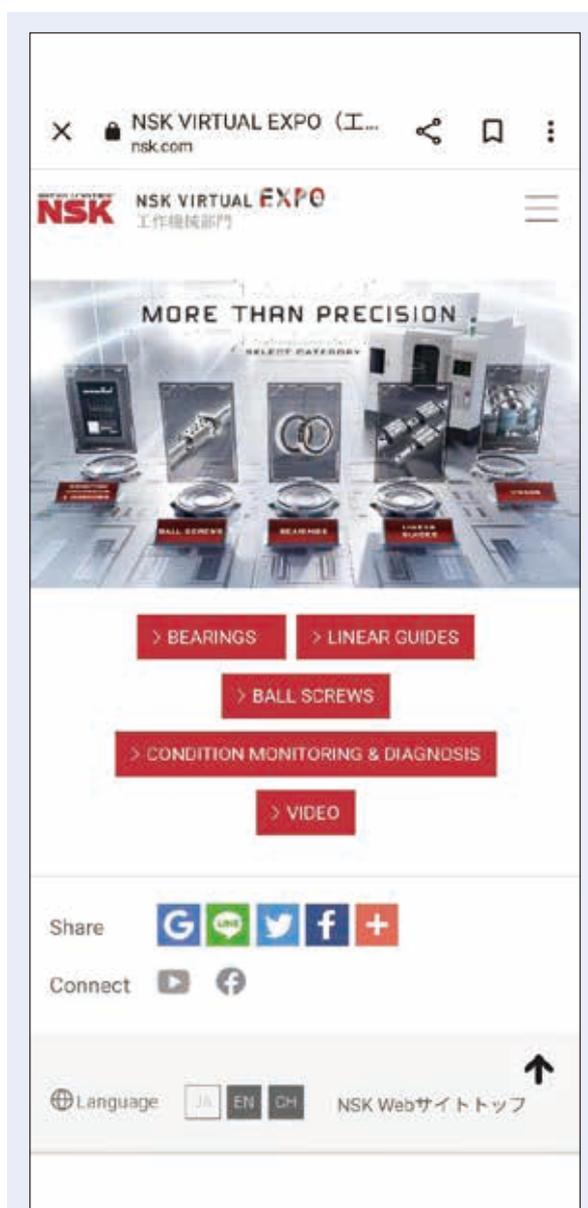


図 2 NSK VIRTUAL EXPO トップページ (スマートフォン)

Fig. 2 NSK VIRTUAL EXPO Top Page (Smartphone)



図3 技術デモンストレーション動画
 Fig. 3 Technology demonstration video

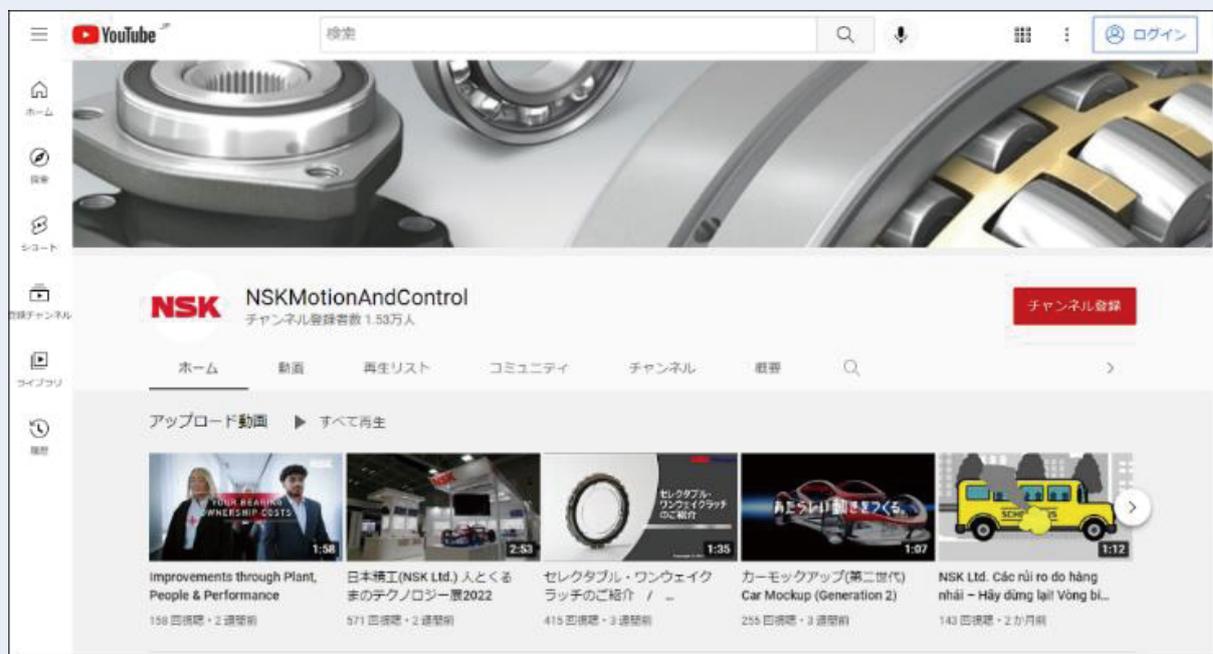


図4 YouTube NSK モーション&コントロールチャンネル
 Fig. 4 YouTube NSK Motion and Control Channel



図5 カテゴリ選択ページ
 Fig. 5 Category selection page

 <p>次世代高精度工作機械用ボールねじ</p> <p>運動方向反転時の摩耗変動を大幅に低減、高精度加工を可能に。</p> <p>Video</p>	 <p>高剛性・長寿命ボールねじ</p> <p>表面改質技術で摩耗を低減、機械のメンテナンスサイクルを延長。</p> <p>Video</p>	 <p>高負荷容量・超高速アンギュラ玉軸受ロバストダイナ™</p> <p>重切削と超高速回転を両立し、ワイドレンジ加工に対応。</p> <p>Video</p>	 <p>エア実位センサシステム</p> <p>測定誤差が圧縮エアのため、スピンドル内での配線が不要で、非接触かつ高精度。</p> <p>Video</p>
 <p>高速・静音ボールねじ</p> <p>NSK独自の高速静音技術によって高速・静音性と小型化を実現。</p> <p>Video</p>	 <p>X1シール付きボールねじ</p> <p>高防塵とグリース密封の両立を実現、機械の更なる信頼性を向上。</p> <p>Video</p>	 <p>高速アンギュラ玉軸受SURGAVE™保持器</p> <p>案内溝面ヒザケット剛性の最適化によりNRRDを低減。保持器の最適設計により低トルクを実現。</p> <p>Video</p>	 <p>高負荷容量ビルトインモータスピンドル</p> <p>高速・高負荷容量を両立。グリース潤滑のため管理簡易。</p> <p>Video</p>

図6 NSK 精密転がり軸受とボールねじの製品群(抜粋)
 Fig. 6 Excerpt of product listings for super precision bearings and ball screws

次世代高精度工作機械用ボールねじ

運動方向反転時の摩擦変動を大幅に低減、高品位加工を可能に。

ボールねじの運動方向反転時の摩擦変動を低減する技術を開発しました。摩擦変動が低減されることにより、摩擦突起と呼ばれる工作機械における運動不安定が減少し、高品位加工を可能としました。

プレスリリース

特徴

- 1 ボールねじの運動方向反転時の摩擦変動により、工作機械の急激な運動変動を低減。
- 2 機械の急激な運動では完全に矯正しきれない急激な突起の山頂を解消するとともに1山頂も低減。
- 3 高品位加工の実現により仕上げ工程の短縮、省エネルギー化に貢献。

構造・原理

急激な運動変動低減技術の効果

	従来の技術を用いたボールねじ	急激な運動変動低減技術を用いたボールねじ
初期 修正前		
初期 修正後		
加工面の 出来栄		

急激な運動変動低減技術を用いたボールねじにより加工高品位が向上

仕上げ加工の短縮が可能

図7 次世代高精度工作機械用ボールねじ、紹介ページ
 Fig. 7 Overview of ball screws for next-generation high-accuracy machine tools

2.3 新製品および新技術紹介ページ

図5に示すトップビューから、製品カテゴリを選択すると、当該製品の最新製品や新技術紹介ページに遷移する。本ページには製品概要や特長を解説した約1分程度のナレーション入り動画、また、その製品説明文、特徴、解説図表を掲載し、来場者が新製品や新技術の内容を短時間で把握できるよう構成している。

図7に一例として「次世代高精度工作機械用ボールねじ」の新製品紹介ページを示す。

3. あとがき

2020年4月、新型コロナウイルス感染拡大による緊急事態宣言が発出された。「東京2020オリンピック」は翌年に延期され、日本最大の工作機械見本市である「JIMTOF 2020」はリアル展示会ではなくWEB展示会「JIMTOF 2020 Online」として2020年11月に開催された。対面での商談や技術交流が困難となる環境下において、NSKではお客様との新しい交流の方法を模索し、新製品や新技術をお客様に的確に伝えるべく、「NSK VIRTUAL EXPO」を開設した。わたしたちを取り巻く環境は、時に予想を超えて変化するが、お客様のニーズや困りごとをタイムリーに捉え、新製品や新技術によるソリューションを提供し、未来に向けて語り合う、そのような交流の場を得るために、今後も「NSK VIRTUAL EXPO」では、お客様にとって有益となる記事を継続して更新掲載していく。

永久磁石同期電動機の振動簡易予測手法と応用



新田 勇*

新田 勇

Study on Simple Vibration Prediction Method for Permanent Magnet Synchronous Motors and Applications

I. Nitta

Permanent magnet synchronous motors (PMSMs) are widely used across industries. In many applications, vibration must be suppressed to improve processing accuracy and comfort.

Currently, magnetic-structural coupled analysis is used to reproduce vibration phenomena, but this is often used only as a countermeasure for defects. Therefore, we devised a simple vibration prediction method using a 1D vibration model.

Here, we explain the mechanism for this method and offer an applied example of vibration suppression through current control and adjustment of the magnetic circuit.

1. まえがき
2. モータの振動と従前の検討手段
 - 2.1 強制振動について
 - 2.2 PMSM 固定子コアに作用する加振力
 - 2.3 構造解析の利点と欠点
3. 振動簡易予測手法
 - 3.1 従前の振動簡易予測手法
 - 3.2 独自手法(VMFS)の概要
 - 3.3 ブロックごとに標準化した加振力を使う是非
 - 3.4 VMFS の運動方程式と変換係数の算定方法
4. VMFS の計算精度と適正化事例
 - 4.1 VMFS の計算精度
 - 4.2 VMFS による設計適正化事例
 - 4.3 VMFS の計算所要時間
5. あとがき

1. まえがき

永久磁石同期電動機 (PMSM) は、出力密度の高さから、車載、家電、産業向けに広く普及している。また音振面でも優れており、PMSM と機構を組み合わせたアクチュエータは、製造装置や人間のすぐそばで動作する機器、例えばサービスロボットなどでも使用される。これらの用途では加工精度の向上、快適さの追求に応えるため、さらなる振動抑制が課題となっている。

現状、振動現象の再現手段としては、磁界—構造連

成解析が用いられる。ただし、これらの手段は振動値を求めてくれるものの、なぜそのような振動が発生するのかについては答えてくれない。よって、前記解析は不具合の対策に使用されるに留まっていることが多い。

そこで、1D 化した振動モデルを用いた振動簡易予測手法を考案した。ここでは、同手法によって明らかとなったメカニズムと、制御設計、磁気回路設計への応用事例を説明する。

* コア技術研究開発センター，第三研究室

2. モータの振動と従前の検討手段

2.1 強制振動について

モータが発生する振動には2種類がある。1つは、回転軸の回転むらによるもので、回転軸に接続された物体を加減速回転させることで加振する現象である。この現象は、広く研究が進んでいるため、本稿では割愛する。

もう1つは、**図1**のようにモータ自体が概ね径方向に変形する振動であり、本稿の研究対象である。

PMSMにおける同現象は、モータの回転にしたがって周期的に加振力が変化し、これに応じて変形量が変わるため、強制振動と呼ばれる。このような強制振動があると、モータケースが固定された物体を加振するため、アクチュエータを振動させる他、周囲の空気を加振することで騒音を発生させるので抑制が求められる。

なお時間次元では、1回転もしくは永久磁石2極分の回転角で周期性が現れるので、前者を回転次数、後者を電気角次数とも呼ぶ。

また、周期性は空間次元にも現れる。例えば**図1**の変形は、モータ円筒断面が4稜と2稜の星形（見た目には4角形と楕円形）に変形している。この周期性を変形モードと呼び、モータは概ね円環形状なので特

に円環モードと呼ぶ。なお、円環モードにも次数があり、稜数が相当する（ただし、0次は相似形の変形、1次は並進の変形）。さらに、変形は空間的に回転するため、ここではロータの回転方向の推移の場合を円環次数として正の次数、逆の推移を負の次数と定義している。

このように円環次数を定義すると、PMSMの強制振動は、時間周波数ごとに複数の円環モード次数の変形が同時に起こっていると捉えることができる。

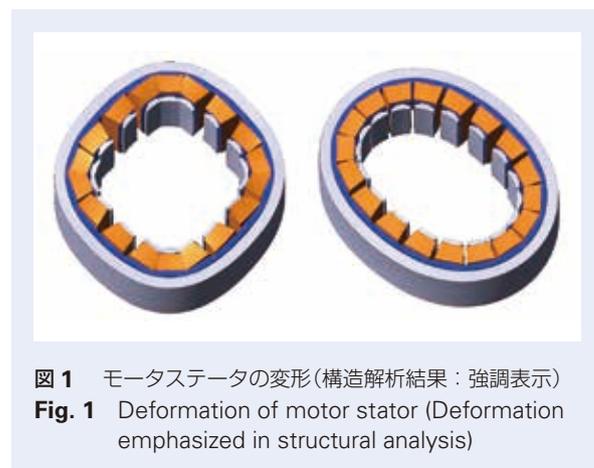


図1 モータステータの変形(構造解析結果：強調表示)
Fig. 1 Deformation of motor stator (Deformation emphasized in structural analysis)

2.2 PMSM 固定子コアに作用する加振力

PMSM はごく一部を除いて、内周側に回転子がある内転型である。これらの形態において、モータケースの変形原因は、固定子コアに作用する電磁加振力である。図 2 に PMSM の断面と固定子コアに作用する加振力分布を示す。図 2 の右側に示される通り、加振力はコアの内周側に突き出た突極の先端に分布している。このように加振力が 3 次元で分布する系において、振動の厳密解は存在しないため、振動を計算するには数値解析である有限要素法等を使った構造解析で実施するのが通例となっている。

2.3 構造解析の利点と欠点

構造解析ソフトウェアは、広く市販されており、物性や拘束などの条件データが準備できれば、高精度の結果を期待できる。加えて形状に制約がないことが利点である。欠点としては大きく 2 つある。1 つ目は加振力分布の入力段階と、加速度や変位などの振動値である出力段階の間に相当する途中経過を示してくれない点である。これは使用者の振動メカニズム把握を困難とし、改善案立案を経験や勘に頼ることを招く。

2 つ目は、解析所要時間が長いことである。例えば、1 つの設計案かつ 1 つの回転速度に限定しても、当方環境で実施した場合は 1 時間以上掛かる。これは、空間として 3 次元を扱う上に、振動では時間についても扱う必要があり、数百の振動周波数を解くことになるためである。この所要時間は、絞り込まれた条件 1 ケースの振動値を予測するには問題とならない。しかし、より良い設計に向けて、電流波形をパラメータとする制御や、磁気回路などを適正化する数百、数千の繰り返しを前提とする場合では大きな問題となる。よって、構造解析は、多数回試行には向いておらず、同用途には使用されない場合が多い。

3. 振動簡易予測手法

3.1 従前の振動簡易予測手法

2 章で説明した構造解析を鑑み、従来にも振動を簡易的に検討できる手法¹⁾が提案されている。いずれも、空隙面の磁束密度を用いて 3 次元空間を断面積のない輪の分布とする加振力密度 1D モデルを使用する手法である。

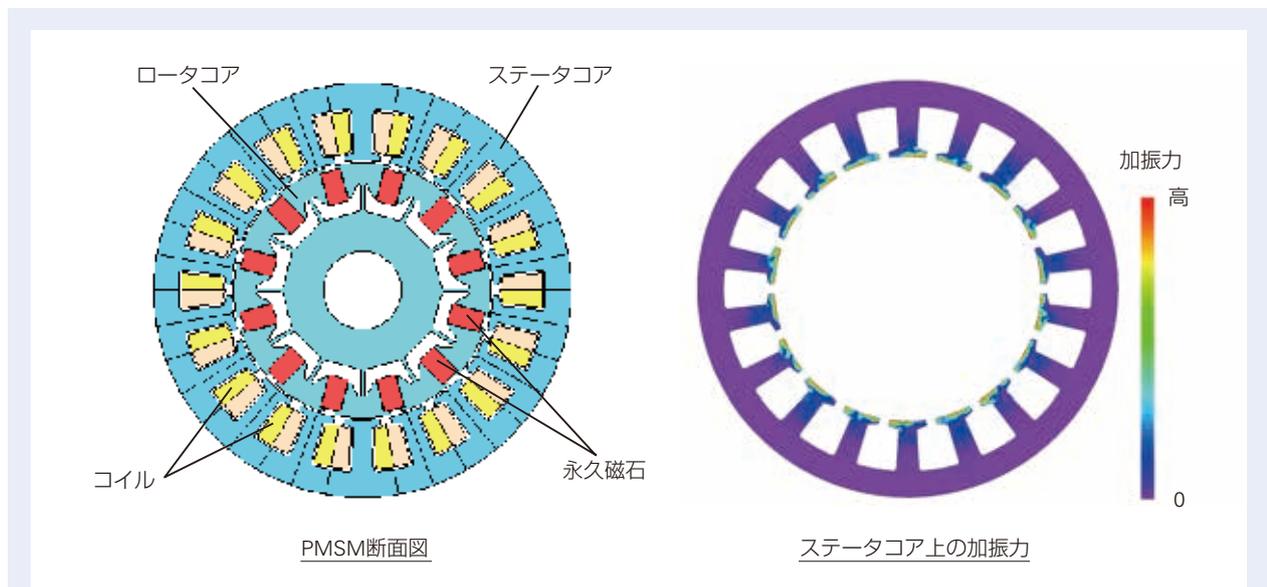


図 2 PMSM 断面図とステータコアに作用する加振力分布
 Fig. 2 Cross-section of PMSM and distribution of excitation force acting on stator core

なお、これら手法の前提として、円周上の剛性は均一な構造であることが望ましい。例えばモータケース外周形状を直方体にすると、誤差が生じる。

さて、従来手法において、モータコアの運動方程式は、時間次元、円環次元の周波数成分ごとに(1)式のように定義されている。

$$m \left(\frac{d^2 r_i}{dt^2} + \omega_i^2 r_i \right) = \pi (B_{ci} - h_j B_{si}) g \quad (1)$$

$$h = \begin{cases} 1 : \left(0 < i \leq \frac{u}{2} \right) \\ -1 : \left(i = 0, \frac{u}{2} < i \leq u \right) \end{cases}$$

$g = \cos \omega' t$ (調和加振の場合)

ここで u は突極数、 i は円環モード次数、 m はステータの全重量、 r はステータ外周のラジアル変位で添え字は円環次数、 ω は添え字円環次数の固有値角速度(周波数の 2π 倍)、 ω' は加振力の角速度、 B は加振力密度の径方向成分振幅で添え字 c は \cos 成分かつ s は \sin 成分、 j は虚数単位である。加振力は、時間次元では電気角 1 周期(2 磁極分の回転角度)、円環(空間)次元では機械角 1 周を基本波とする周期関数と定義されている。

(1) 式は、円環次元の加振力分布によって変位や加速度などの振動値は影響を受けるが、周波数成分に分解すれば干渉を受けないこと示している。

また、加振力密度の同周波数成分は、空隙磁束密度から算出している。

ただし、このモデルにおいて、空隙面の加振力密度を振動計算へ適用するためには、高いハードルがある。それは空隙加振力密度と、実際に変形が起こる固定子コアのヨーク部分やモータケースに作用する加振力分布とでは円環次数が異なることであり、変換が必要になることである。詳細は 3.3 で述べる。

3.2 独自手法(VMFS)の概要

従前手法の問題点を回避すべく、**図 3** に示すように固定子コアを 1 突極ごとに分割したブロックの集合体と捉えるのが独自手法である。加振力としては、空隙の加振力密度ではなく、このブロックに作用した電磁力そのものを使う。よって、VMFS (Vibration

prediction Method using excitation Force acting on Salient poles) と命名した。

ブロックに作用した電磁力をベクトル合成した標準化電磁力を使うので、突極形状の影響を排除可能となった。空間的なデータ個数は、突極数となり大幅に減少する。これは 2 種の利点を提供する。第 1 の利点は、加振力として低次の円環次数成分のみを扱うので、人間的に把握しやすい点である。第 2 の利点は、計算量が極端に小さいことである。

この説明として、VMFS のシステム概要とデータフローを図に示す。大まかには、標準化電磁力を、回転次数および円環次数に複素数 2 次元フーリエ変換して周波数領域の加振力行列とし、予め求めていた変換係数行列とアダマル積算して振動値行列を得る。これを実数 2 次元逆フーリエ変換することで、時間領域の振動値に戻している。

アダマル積算では、行列の他項との干渉はない。正逆のフーリエ変換で繰り返し計算は含まれるが、データ数は突極数と時間分解能の積であるため非常に少ない。よって、構造解析で用いられる未知数数百万の連立方程式の解法と比べて極端に計算数を削減できる。実際の計算時間の比較は 4 章で紹介する。

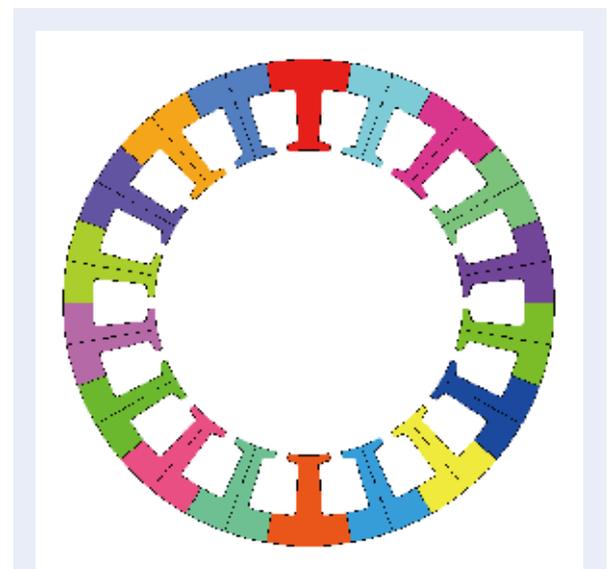


図 3 加振力標準化ブロック(突極ごとブロック)
Fig. 3 Sampling blocks for excitation force (per stack)

3.3 ブロックごとに標準化した加振力を使う是非

前項に示したように VMFS では、加振力としてブロックごとに標準化した値を使用する。よって、取りうる円環次数 i の範囲は、突極数を u とすれば、サンプリング定理から(2)式の範囲のみ存在する。

$$-u/2 \leq i < u/2 \quad (2)$$

では、実現象はどうかというと、PMSM の電磁力を決める永久磁石とコイルの起磁力分布には、(2)式の範囲外の円環 n 次成分が存在する。しかし、加振力はステータ突極に集約されるため、(3)式にしたがって変換され、加振力の円環次数は、やはり(2)式の範囲に収まる。

$$i = \begin{cases} n \bmod u : (n \bmod u < u/2) \\ (n \bmod u) - u : (n \bmod u \geq u/2) \end{cases} \quad (3)$$

なお mod は剰余演算子である。

(3)式は、通信工学で言うエイリアス現象（低サンプリングレートによる折り返し虚像の発生）と同じであるため、起磁力と加振力についてもエイリアス変換と呼んでいる。

ここで(3)式の下の場合は、 $i < 0$ となるが、これは加振力分布が逆回転することを示す。

実例で説明すると、例えば図4は12磁極18突極モータの磁界解析結果で、図中の色は磁束密度の絶対値分布を示している。12磁極であるため起磁力の2乗分布は最小で円環次数 $n = 12$ 次であるが、図4の色分布を見てわかるように加振力分布の円環周期は6

周期で、ロータとは逆方向に回転するため、円環次数は -6 次であることを示している。これは、(3)式の下の場合に該当し、下式のように算出される。

$$i = (n \bmod u) - u = (12 \bmod 18) - 18 = 12 - 18 = -6$$

このように、少なくとも円環次数面では、1突極をブロックとして標準化した加振力を使っても可と言える。

ちなみに加振力分布は、ロータ1回転当たり $|n/i|$ 回転することにより、ロータ1回転当たり n 周期の加振力変動と矛盾しない。

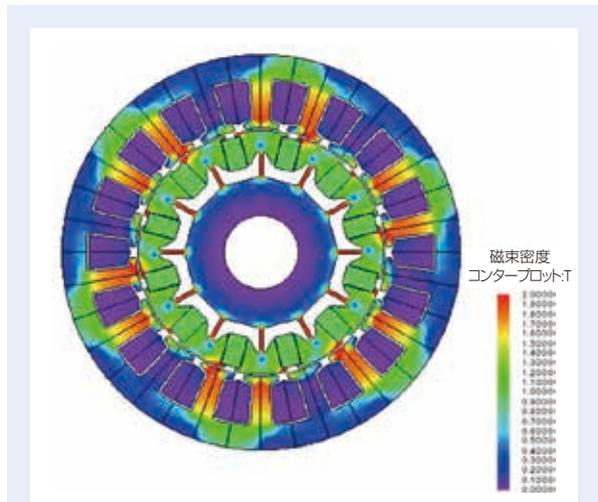


図4 PMSM の磁束密度絶対値分布
Fig. 4 Distribution of absolute values for magnetic flux density in PMSM

3.4 VMFSの運動方程式と変換係数の算定方法

VMFSのシステムおよびデータフローを図5に示す。同図に示した通り、主要な処理は正逆のフーリエ変換とアダマール積算であり、既存の一般計算アルゴリズムが使用できる。変換係数の算定方法は、運動方程式から順を追って説明する。

VMFSでは、加振力密度ではなく突極ごとの加振力を時間周波数ごとかつ円環次数ごとに周波数分解した値となる F を使用するため、(1)式を(4)式のように書き換える。円環次数 i はエイリアス現象により(2)式の範囲に折り返されているので、 h による場合分けは必要ない。

$$\begin{aligned} \delta_{im} \left(\frac{d^2 r_i}{dt^2} + \omega_{0i}^2 r_i \right) &= \pi F \\ &= \pi (F_{ci} - jF_{si}) g \end{aligned} \quad (4)$$

ここで添え字 c は \cos 成分かつ s は \sin 成分を示す。また、突極ごとの加振力を使うため、左辺に円環次数 i ごとに異なる係数 δ を導入して補正している。

(4)式の十分時間経過した時点の特解となる変位は(5)式、同じく加速度は(6)式となる。なお固有値 ω_{0i} の振動値の特異点を回避するためダンピング係数 ζ から導かれる D と位相 ϕ を導入している。

$$r_i = \text{特解} = \frac{\pi F}{\delta_{im} \omega_{0i}^2} D e^{j\phi} \quad (5)$$

$$\frac{d^2 r_i}{dt^2} = \frac{\pi \omega'^2 F}{\delta_{im} \omega_{0i}^2} D e^{j\phi} \quad (6)$$

$$D_i = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega'^2}{\omega_{0i}^2}\right)^2 + \left\{2\zeta \frac{\omega'}{\omega_{0i}}\right\}^2}}$$

$$\phi_i = \tan^{-1} \frac{2\zeta \frac{\omega'}{\omega_{0i}}}{1 - \frac{\omega'^2}{\omega_{0i}^2}}$$

変換係数となるコンプライアンスとイナータンスは、それぞれ(7)式と(8)式となる。

$$\text{Compliance}_{-i} = \frac{r_i}{F} = \frac{\pi}{\delta_{im} \omega_{0i}^2} D_i e^{j\phi_i} \quad (7)$$

$$\text{Inertance}_{-i} = \frac{d^2 r_i}{F dt^2} = \frac{\pi \omega'^2}{\delta_{im} \omega_{0i}^2} D_i e^{j\phi_i} \quad (8)$$

なお、 δ_{im} は一般的に未知であるが、変位 r の低周波数の極限 $\lim_{\omega' \rightarrow 0} r$ を取ると(9)式のように変形できる。

$$\begin{aligned} \lim_{\omega' \rightarrow 0} r_i &= - \lim_{\omega' \rightarrow 0} \frac{\pi F}{\delta_{im} \omega_{0i}^2} D_i e^{j\phi_i} = \frac{\pi F}{\delta_{im} \omega_{0i}^2} \\ \delta_{im} &= \frac{\pi F}{\omega_{0i}^2 \lim_{\omega' \rightarrow 0} r_i} \end{aligned} \quad (9)$$

$\lim_{\omega' \rightarrow 0} r_i$ は、固有値より十分小さい周波数における構造解析結果(周波数応答解析)で代用できるので、ごく少ない計算量で δ_{im} を逆算できる。またそれぞれの固有値周波数については、構造解析(固有値解析)の結果を使用している。

以上の手順にて求めたコンプライアンスとイナータンスを、図6と図7にそれぞれ示す。

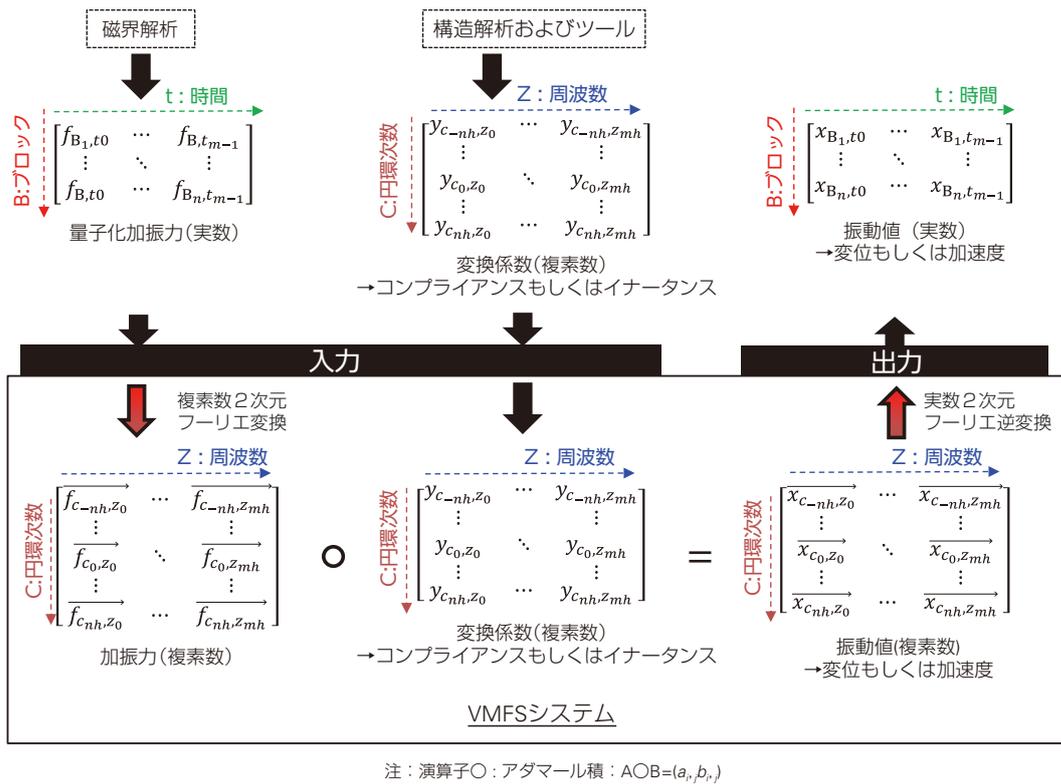


図5 VMFS のシステムおよびデータフロー

Fig. 5 VMFS system and data flow

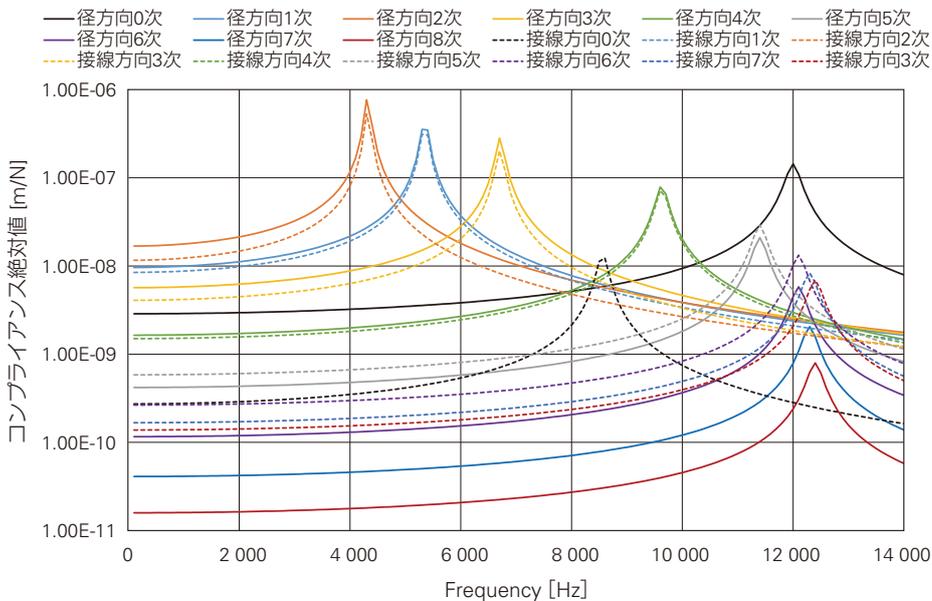
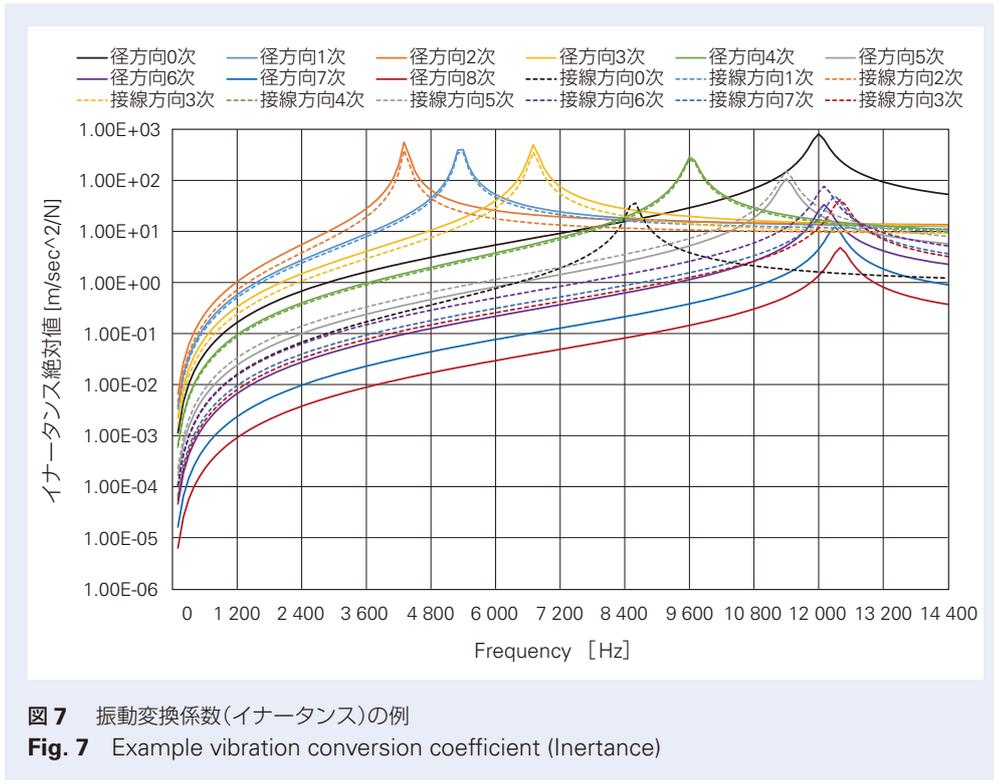


図6 振動変換係数(コンプライアンス)の例

Fig. 6 Example vibration conversion coefficient (Compliance)



4. VMFS の計算精度と適正化事例

4.1 VMFS の計算精度

VMFS の計算結果として、図2の12磁極18突極構成のPMSMへ適用した例を示す。ブロックごとの時間領域の加振力を図8、同円環次数ごとの周波数分解結果を図9に、加速度の径方向成分円環最大値かつ時間実効値を、図10に示す。なお使用したイナータンスは図7の値である。またロータ回転数は1000 rpmである。

同モータは2磁極3突極の倍数構成に当たり、加振力は0次と回転12次の倍数次成分(時間周波数200 Hzおき)が卓越する。また、円環次数としては、

0次、-6次、6次に相当する。200 Hzおきの加振力は図に示すようにおおむねなだらかに減少するが、振動加速度が600 Hzおきに卓越しているのは、図に示したように円環0次のイナータンスが、円環6次、同-6次よりも10倍以上大きいことによる。このように、VMFSでは加振力、変換係数、振動値がすべて1Dモデルの定量値として得られるため、振動メカニズムを把握しやすい。

なお図10にて構造解析の加速度計算結果と比較しているが、全体に渡って良好な精度が得られており、VMFSの精度面でも有効性が証明できている。

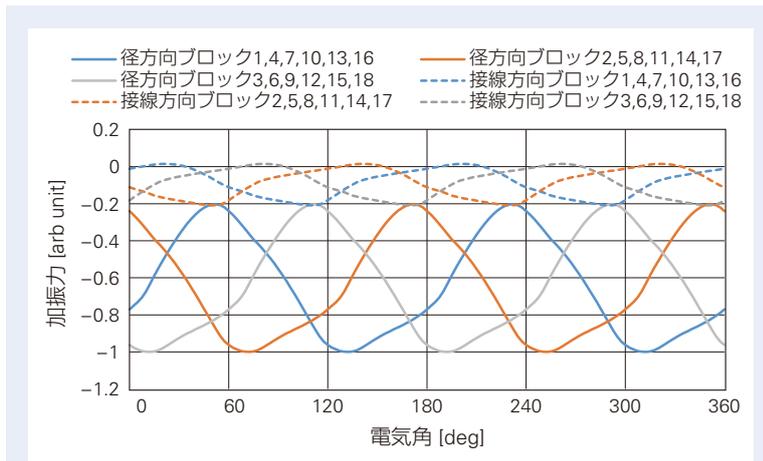


図8 ブロック標本化加振力
Fig. 8 Excitation force of block samples

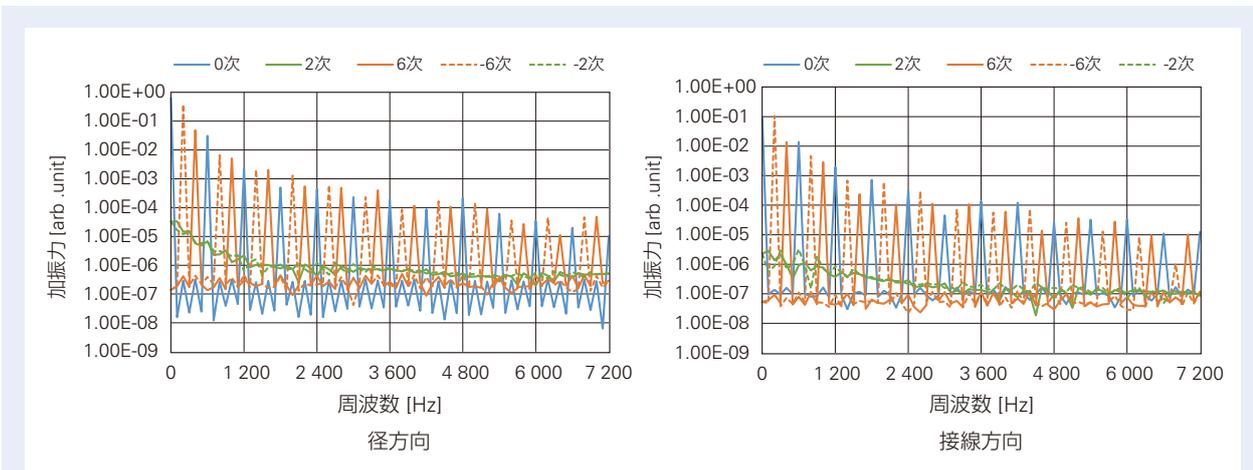


図9 ブロック標本化加振力の2次元フーリエ変換結果
Fig. 9 Two-dimensional Fourier transform result for excitation force of block samples

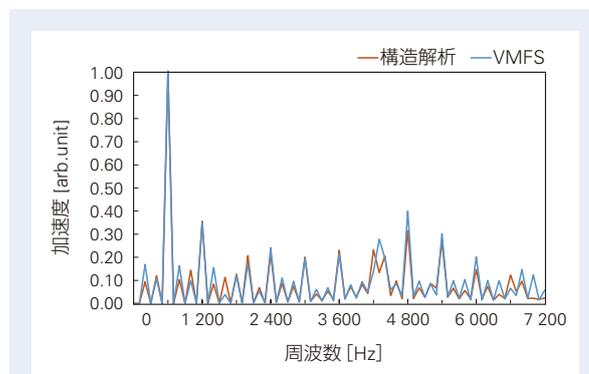


図10 振動加速度の径方向成分(計算方式の比較)
Fig. 10 Radial component of vibration acceleration (comparison of calculation methods)

4.2 VMFS による設計適正化事例

VMFS を用いて、振動値トルクリップルを抑制すべく、電流制御、ロータ磁極形状を適正化した事例を紹介する。モータ構成は前節と同じである。適正化諸元は表 1 にまとめて示す。

結果として 25 世代 570 個体で収束した適正化の全体的傾向を図 11 に、初期と適正化後の振動加速度の比較を図 12 に示す。きれいな応答曲面が表れており、良好な適正化が実施できたことを示している。選択した適正值では、600 Hz 振動加速度は 1 から 0.183 (構造解析の検算結果)、トルクリップルは 40 % から 2.5 % まで低下した。

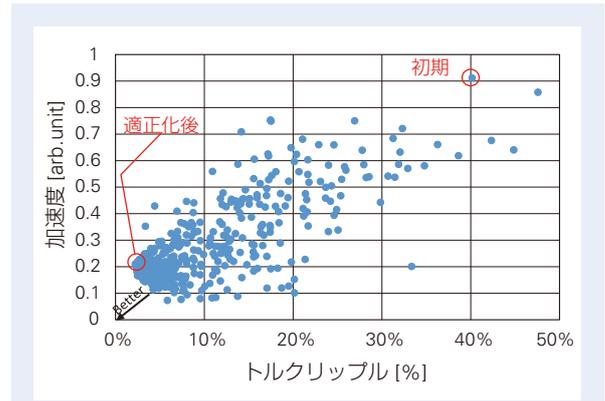


図 11 振動およびトルクリップル抑制適正化結果
Fig. 11 Vibration and torque ripple suppression optimization results

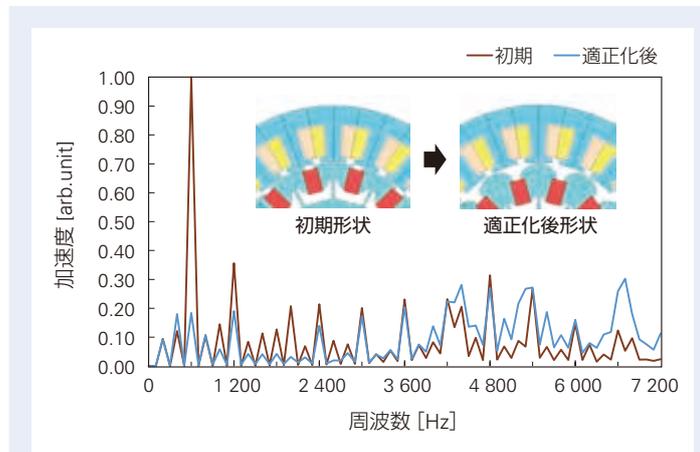


図 12 振動加速度の径方向成分(適正化前後の比較、構造解析結果)
Fig. 12 Radial component of vibration acceleration (comparison before and after optimization, structural analysis results)

表 1 適正化諸元
Table 1 Specifications after optimization

項目	内容
適正化アルゴリズム	多目的遺伝アルゴリズム (JMAG) 個体数: 20, 子世代個体数: 15
適正化目的関数	トルクリップル値 (望小項目) 600 Hz 振動加速度 (望小項目)
適正化条件	4300 Hz (円環 2 次固有値) 振動加速度 600 Hz の倍数周波数振動加速度 初期値状態より極力増やさない
適正化パラメータ	dq 軸 6 次電流 (基本波の 10 %以下) ロータ突極形状 (3 接線円筒面曲率)

4.3 VMFS の計算所要時間

前節の計算環境は、Intel (R) Xeon (R) CPU E5-2690 v4 @ 2.60 GHz, 14 個のコアである。磁界解析、構造解析、適正化エンジンは JMAG V20.2 を使用した

VMFS は JMAG の応答値スクリプトから呼び出している。なお、磁界解析角度刻みは、1 磁極対（機械角 60 度）を 144 分割である。

1 ケースの計算所要時間は、磁界解析が 180 秒程度、VMFS はスクリプトのターンアラウンドで 2 秒弱である。前節の適正化はおよそ約 29 時間で終了した。

参考ながら、VMFS 同様の構造解析は、4800 秒程度掛かっている。

5. あとがき

本稿では、PMSM に使用できる強制振動の簡易計算手法である VMFS について、概念および特長である振動メカニズムが把握しやすいことと、設計適正化に実用できる有効性を示した。適正化事例では、制御設計、磁気回路設計の併用の例を紹介したが、例えば電流制御のみでも使用は可能であり、広い開発時期で使用可能と考えている。今後はさらに普及を図り、設計の知見を充実させていくことで、モータの音振設計は他工程の後回し、実機測定結果の検算とする位置づけといった状況の打破を図っていく。

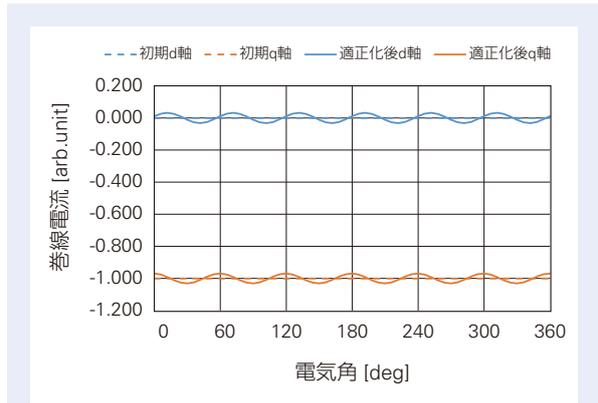


図 13 巻線電流 dq 軸波形(適正化前後の比較)
 Fig. 13 Winding current dq axis waveform (comparison before and after optimization)

参考文献

- 1) 鈴木照平ら、"埋込磁石同期電動機 (IPMSM) における電磁共振条件の検討", 明電時報, Vol.367, No.2, (2020) 6-11.

遺伝子改変マウス作製のための自動胚操作 システムの確立

植田 裕基*, 江藤 智生**, 田中 伸明*



植田 裕基

Establishment of an Integrated Automated Embryonic Manipulation System for Producing Genetically Modified Mice

H. Ueda, T. Eto, N. Tanaka



田中 伸明

Springer Nature 及び、公益財団法人実験動物中央研究所の転載承認を得て、Scientific Report. 11 (2021) 11770. から和訳のうえ掲載.

Genetically modified mice are commonly used in biologic, medical, and drug discovery research, but conventional microinjection methods used for genetic modification require extensive training and practical experience. Here we present a fully automated system for microinjection into the pronucleus to facilitate genetic modification. We first developed software that automatically controls the microinjection system hardware. The software permits automatic rotation of the zygote to move the pronucleus to the injection pipette insertion position. We also developed software that recognizes the pronucleus in 3-dimensional coordinates so that the injection pipette can be automatically inserted into the pronucleus, and achieved a 94% insertion rate by linking the 2 pieces of software. Next, we determined the optimal solution injection conditions (30 hPa, 0.8–2.0 s) by examining the survival rate of injected zygotes. Finally, we produced transgenic (traditional DNA injection and piggyBac Transposon system) and knock-in (genomic editing) mice using our newly developed Integrated Automated Embryo Manipulation System (IAEMS). We propose that the IAEMS will simplify highly reproducible pronuclear stage zygote microinjection procedures.

1. はじめに

2. 結果

- 2.1 自動インジェクションのためのフロー
チャート, ハードウェア, ソフトウェア
- 2.2 前核へのピペット挿入の自動化
- 2.3 注入条件の確立
- 2.4 遺伝子改変マウスの作製

3. 考察

4. 実験方法

- 4.1 動物
- 4.2 受精卵の採取, 凍結保存, 胚移植
- 4.3 受精卵へのインジェクション
- 4.4 遺伝子改変マウス作製の溶液調製
- 4.5 遺伝子改変マウスの解析
- 4.6 統計解析

5. あとがき

1. はじめに

遺伝子改変マウスは、生物学、医学、創薬研究など幅広い分野で広く使用されている^{1)~4)}。哺乳類の遺伝子改変は、マウスを用いて1980年に初めて報告された⁵⁾。それ以来、トランスジェニックマウスの産生

効率を改善するために、トランスポゾン法^{6), 7)}などいくつかの方法が開発されてきた。また、ゲノム編集技術の出現は、遺伝子改変マウスの作製にさらなる革命をもたらした。例えば、以前はES細胞で行われて

* 新領域商品開発センター, 技術開発第一部
** 公益財団法人 実験動物中央研究所

いた遺伝子ターゲティング⁸⁾ およびノックイン^{9), 10)}は、ゲノム編集を介して受精卵で実施されるようになった。

マウスの遺伝子改変には、マウス受精卵の前核へのマイクロインジェクションが主に用いられている。この方法は、哺乳類の遺伝子改変⁵⁾を行うために最初に使用され、多くの研究室で広く適用されている。しかしながら、現在のマイクロインジェクション技術は、わずか1つの受精卵に溶液を注入する場合でも、専用のハードウェアを操作しなければならないため、多くのトレーニングを必要とする¹¹⁾。さらに、マイクロインジェクション技術を習得するには、長年の経験も必要である¹²⁾。手動での操作を補助するために電動インジェクタおよびジョイスティックが開発されているが^{13), 14)}、マイクロインジェクションの最も重要なステップ、すなわち、受精卵の保持位置を決定し、受精卵に焦点を合わせ、注入部位を選択し、正確な容量を注入する操作は、依然として手技に依存している。

本研究では、マイクロインジェクションによる遺伝子改変を容易かつ高い再現性で実現するため、受精卵前核へのインジェクションを完全自動化する方法を検討した。まず、完全自動化に必要な一連の動作を特定し、複数の装置によって構成されるハードウェアを開発した。その後、ハードウェアを制御するための新しいソフトウェアを開発した。最後に、新たに開発したハードウェアとソフトウェアを統合した自動胚操作システム (Integrated Automated Embryonic Manipulation System : IAEMS) を開発し、遺伝子改変マウスの作製における IAEMS の有用性を実証した。

2. 結果

2.1 自動インジェクションのためのフローチャート、ハードウェア、ソフトウェア

最初に、自動インジェクションを実現するために必要な動作を洗い出し、フローチャートを設計した(図1)。このフローチャートは、受精卵を保持する、前核に焦点を合わせる、溶液を注入する、受精卵を放出するなどの一連の操作から構成されている。

次に、このフローチャートを実現するため、先に開発した電動マニピュレーションシステム (Electric Manipulation System : EMS) と電動インジェクタを顕微鏡に組み込んだハードウェアを開発した(図2, 図3)。既存の手動式マイクロインジェクション装置は、受精卵操作のピペットを3次元で移動させるマニピュレータ、受精卵を2次元で移動させる試料ステージ、およびインジェクション用ポンプが搭載されている。インジェクションを自動化するためには、すべての機器を連動させて駆動させる必要があるが、既存の装置は対応していない。そのため、全ての装置を電動化させ、EMSで制御する必要がある。また、注入精度を上げるために、各機器には微細な動きが要求されるが、EMSは必要な仕様を満たしている(表1)。さらに、EMSにインストールされたソフトウェアは、受精卵の位置を自動的に検出し(図3)、各ピペットを注入前の受精卵付近に移動させる、注入後の受精卵を非操作領域に移動させる機能(図4)を有している。

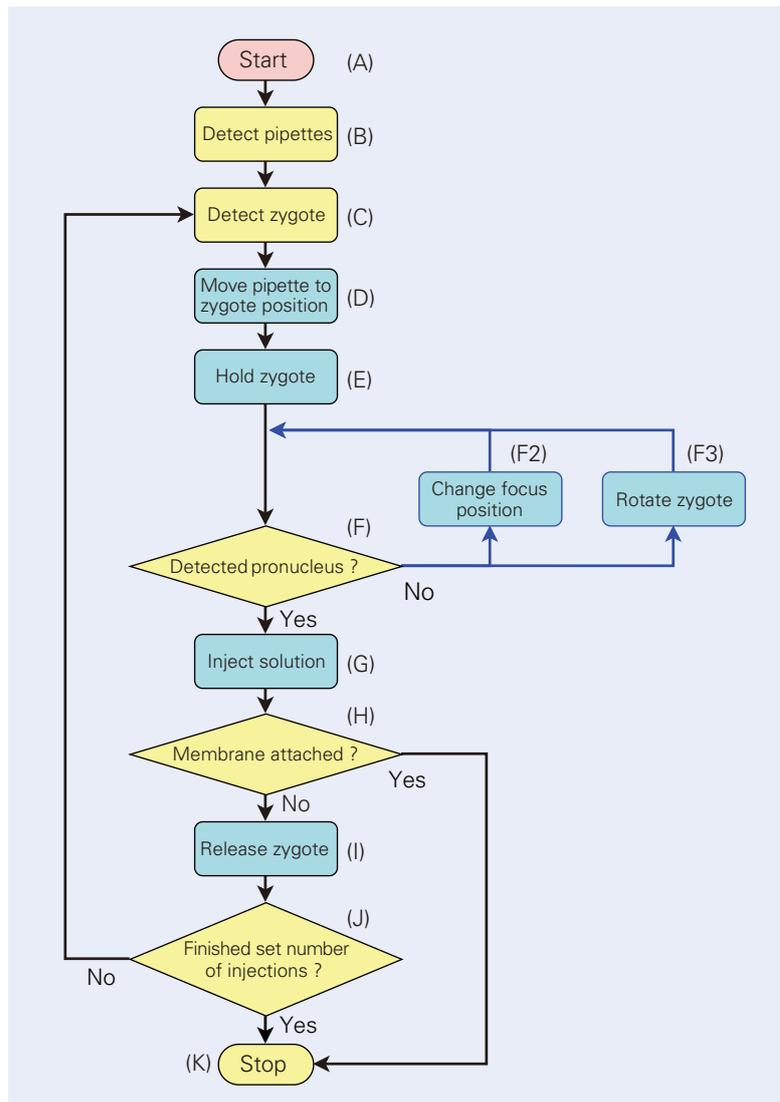


図1 自動インジェクションに必要なフローチャート

Fig. 1 Flowchart required for fully automated solution injection

このフローチャートは、各ステップで操作対象物の検出と成否判定を行い(黄)、作業を実行する(青)。(A)コントローラに指令を出し、自動インジェクションを開始する。(B)各ピペットの現在位置の座標を検出する。(C)受精卵の位置を検出する。(D)各ピペットを受精卵の位置まで移動させる。(E)受精卵をホールディングピペットで保持し、保持圧を調整する。(F)前核の現在位置を検出する。前核が検出できない場合は、受精卵を保持したままホールディングピペットの高さを変更し(F2)、再度前核を検出する(F)。複数回行っても前核が検出されない場合は、インジェクションピペットで受精卵を垂直方向に回転させ(F3)、前核を再検出する(F)。(G)インジェクションピペットを前核に挿入しインジェクションする。(H)インジェクションした後、核膜がインジェクションピペットに付着し、外れない場合は、手順を中止する(K)。核膜をインジェクションピペットから外し、(A)を再開する。(I)受精卵を非操作領域に移動し、受精卵をリリースする。(J)全ての受精卵にインジェクションが行われたか確認する。インジェクションしていない受精卵が残っている場合は、(C)に戻り継続する。(K)注入可能な全ての受精卵に溶液を注入した後、自動インジェクションを停止する。

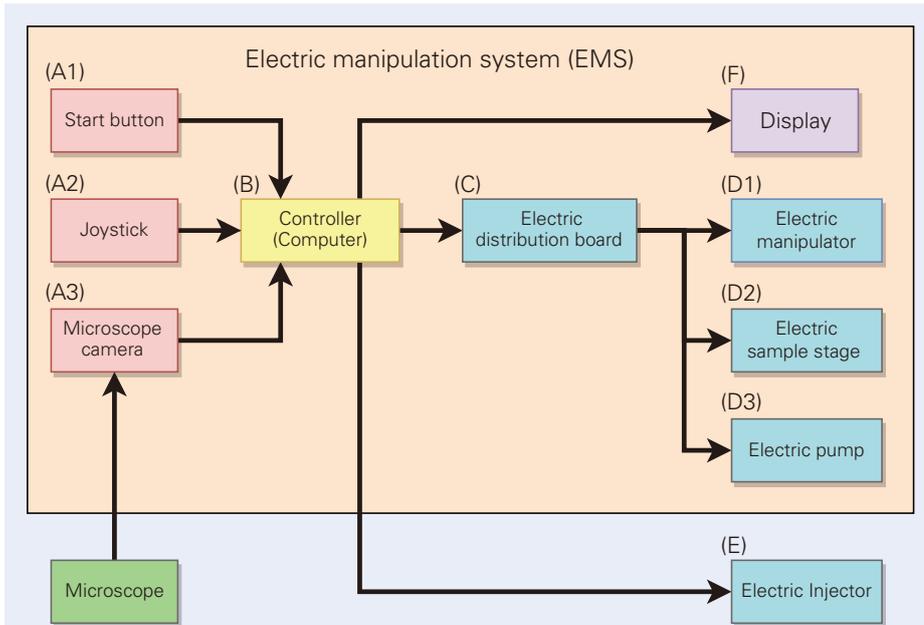
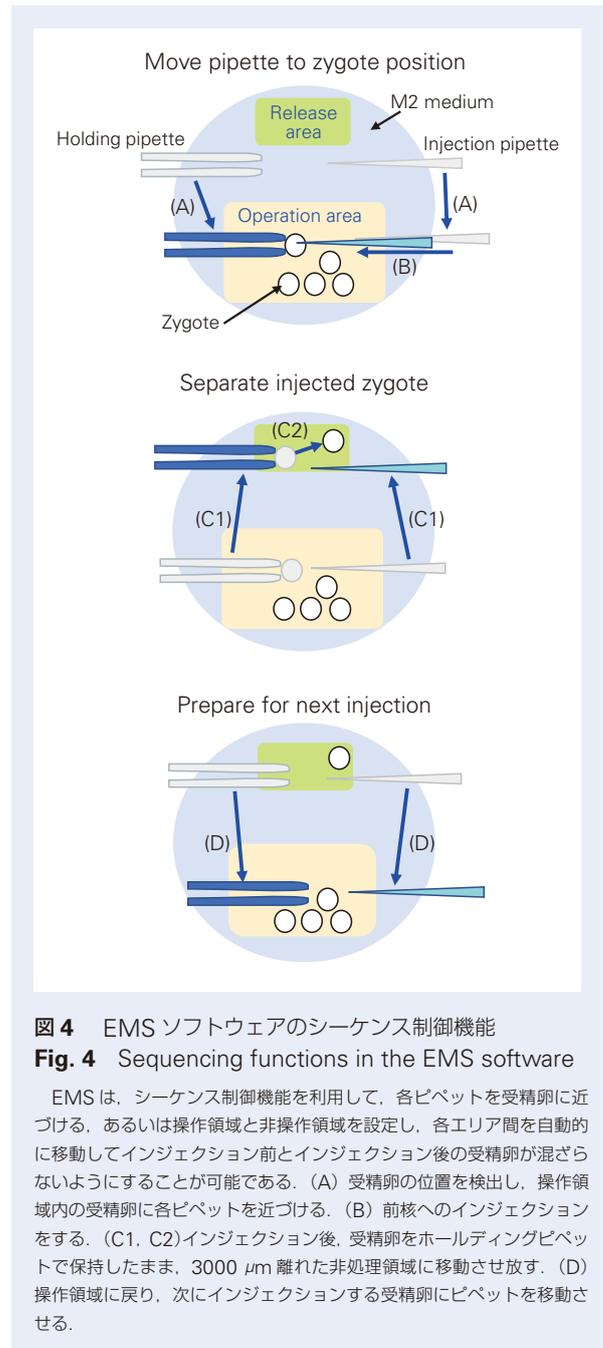
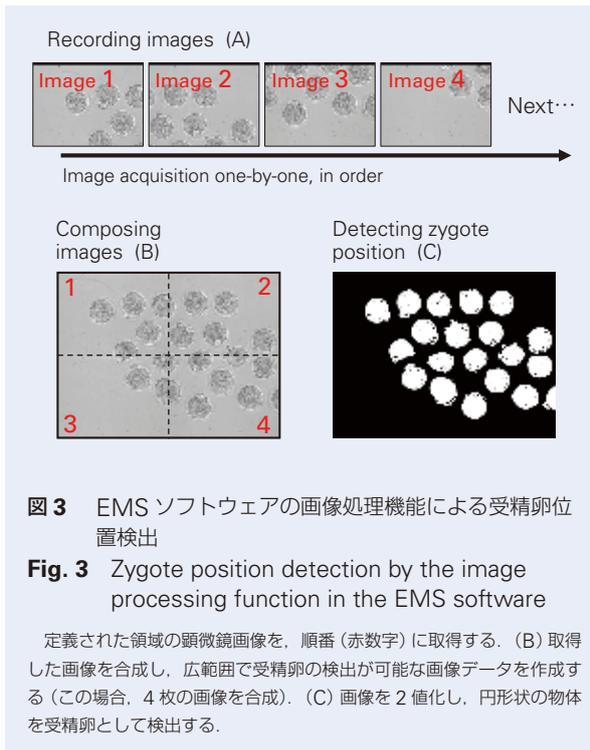


図2 ハードウェア
Fig. 2 Hardware

ハードウェアは、電動マニピュレーションシステムと電動インジェクタが接続され、入力装置(赤)、制御装置(黄)、出力装置(青)の3つの主要要素で構成される。ハードウェアは、外部から信号が入力されると(A)、制御装置がその信号を解析し(B)、解析したデータに従って複数の機械を制御し(C)、電動機器(D、E)を動作させる。(D)電動マニピュレータは各ピペットを3次元的に移動させ(D1)、電動試料ステージは受精卵の入った皿を2次元的に移動させ(D2)、電動ポンプはホールディングピペットの保持圧力を増減させる(D3)。(E)電動インジェクタはあらかじめ設定した注入時間、注入圧力をかけて溶液をインジェクションする。自動インジェクションでは、(A1)の信号がコントローラに入力されると、顕微鏡カメラ(A3)で取得した顕微鏡画像に基づいて電動機器(D、E)が動作する。手動インジェクションでは、操作者はディスプレイ(F)を見ながらジョイスティック(A2)を操作し、制御装置(B)に操作指令を入力して動作させる。また、操作者が手動で電動インジェクタ(E)に注入指令を入力する。

表1 電動マニピュレーションシステム(Electric Manipulation System : EMS)の仕様
Table 1 Specifications of the electric manipulation system (EMS) device

Specifications	Electric manipulator	Electric sample stage	Electric pump
Stroke	20 mm		1179.09 μl
Resolution	0.1 μm		0.0039 $\mu\text{l}/\text{step}$
Maximum velocity	5 mm/s		5 s^{-1}
Driving method	5-phase stepping motor		



2.2 前核へのピペット挿入の自動化

従来のマイクロインジェクションにおいて操作者は、前核の位置を目視で確認し、受精卵を回転させて前核の位置を調整し、次いでインジェクションピペットを前核に挿入する。私たちの知る限り、この操作を自動的に実行できるソフトウェアは存在しない。そこで本研究は、2つの機能を搭載したソフトウェアを新規に開発した。まず、受精卵を自動的に回転させ、前核を位置決めする機能を開発した(図5)。受精卵の回転は、ホールディングピペットの保持圧力を変化させ、インジェクションピペットを受精卵に接触するように移動させることによって実現した。次に、前核の位置を2次元座標で認識し、その位置へインジェクションピペットを自動的に挿入する機能を開発した。しかし、前核へのピペット挿入成功率は70%(n=50)にとどまった。そこで、前核の位置を3次元座標で認識し、インジェクションピペットの高さ位置を補正する機能へと改良したところ、ピペット挿入の成功率は94%(n=50)と、有意に向上した(図6)。

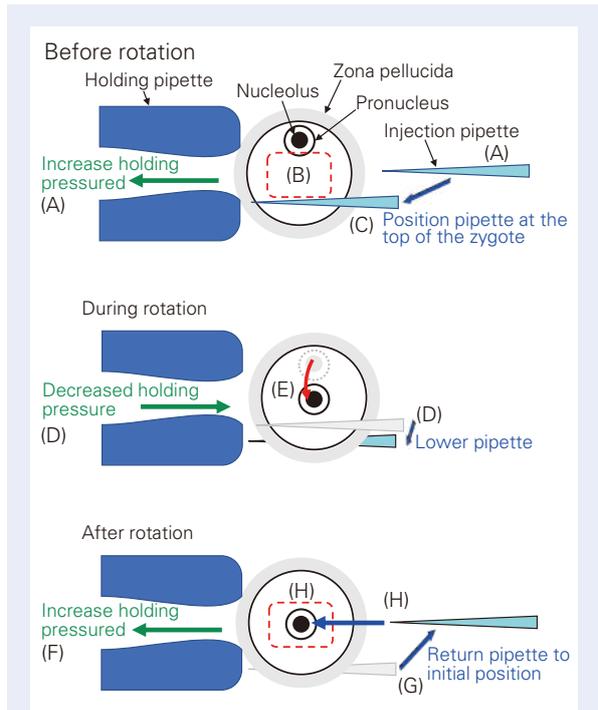
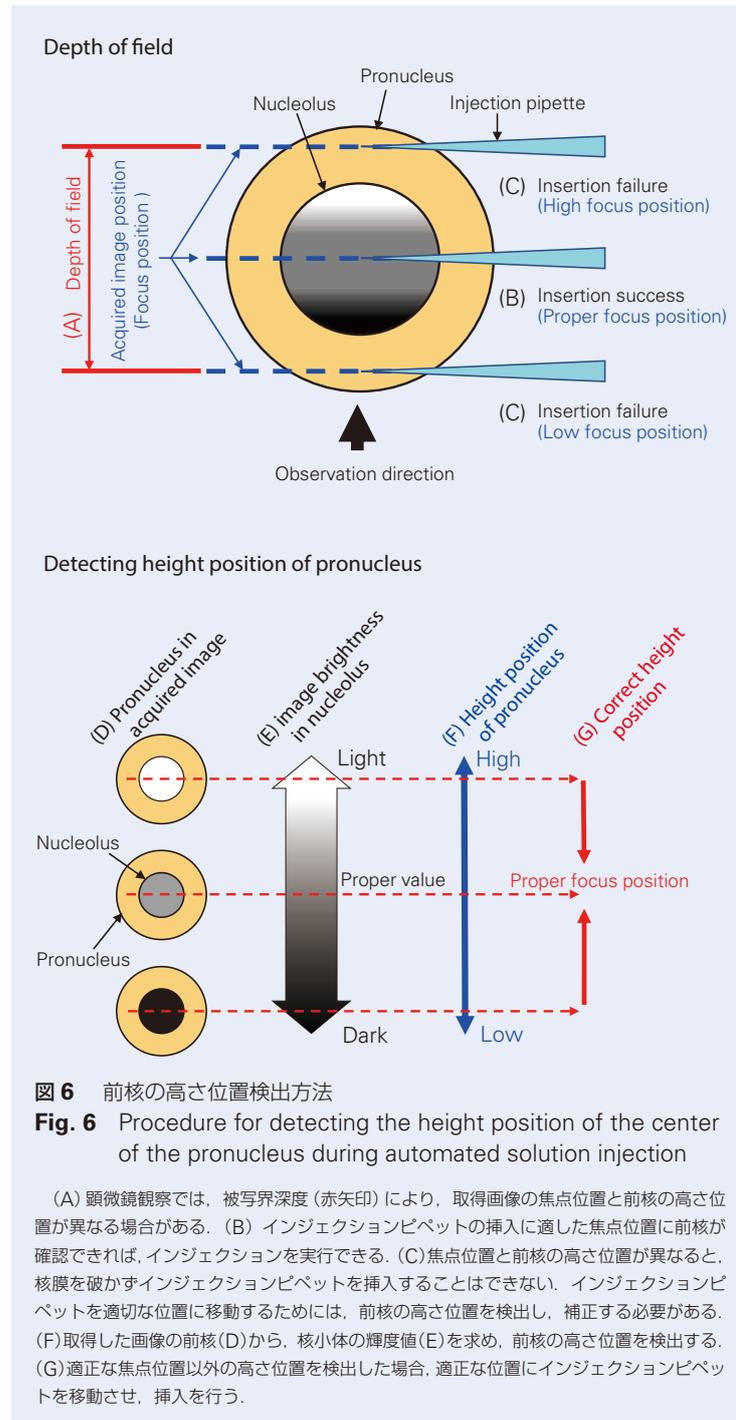


図5 受精卵を回転させて前核を注射ピペット挿入位置に移動させる手順

Fig. 5 Procedure to fully rotate the zygote to move the pronucleus to the injection pipette insertion position

(A)回転前、受精卵は保持圧力が上昇した状態でホールディングピペットに保持されている。インジェクションピペットは受精卵の中心の高さ位置で静止している。(B)受精卵の前核が、自動インジェクション可能範囲(赤点線四角)の外側にある。(C)前核と反対側の受精卵上部にインジェクションピペットが移動する。(D)保持圧力を低下させ、受精卵がホールディングピペットから外れ、直ちにインジェクションピペットを下げると受精卵が回転する。(E)回転に伴い、前核は受精卵の端から中央部へ移動する(赤矢印)。(F)回転後、保持圧力を上げ、受精卵を再度保持する。(G)インジェクションピペットを初期位置(A)に戻す。(H)前核が自動インジェクションの範囲内になったら、インジェクションピペットを前核に挿入する。

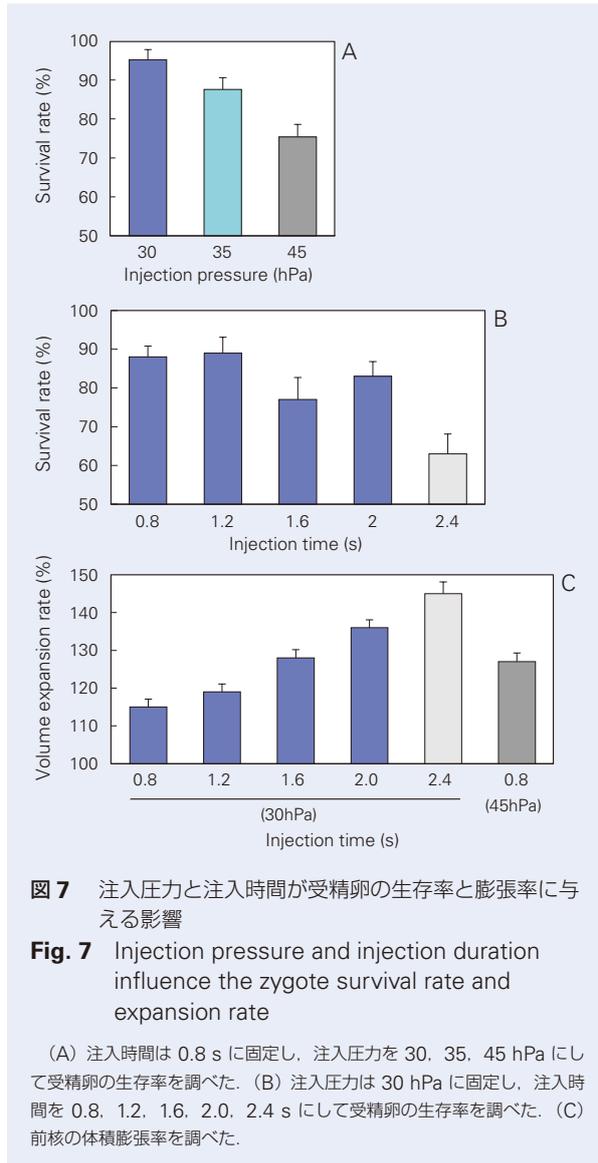


2.3 注入条件の確立

前核へ大量の溶液を注入すると、受精卵に悪影響を及ぼすことがわかっている¹¹⁾。そのため、注入量を決定する注入圧力および注入時間を適切に設定することが重要である¹⁵⁾。この実験は、注入後の受精卵の生存率を低下させることなく、できるだけ多くの量を注入するために、注入圧力と注入時間の最適化を行った。生存率は、注入1時間後に受精卵の形態を観察して決定した。

最初に、適切な注入圧力を決定するために、注入時間を0.8 sに固定し、溶液を30, 35, 45 hPaでインジェクションした(n = 188, 191, 200)。インジェクション後の受精卵の生存率は、30 hPaでほぼ100%であったが(図7A)、注入圧力が35 hPaを超えると生存率は有意に低下した。

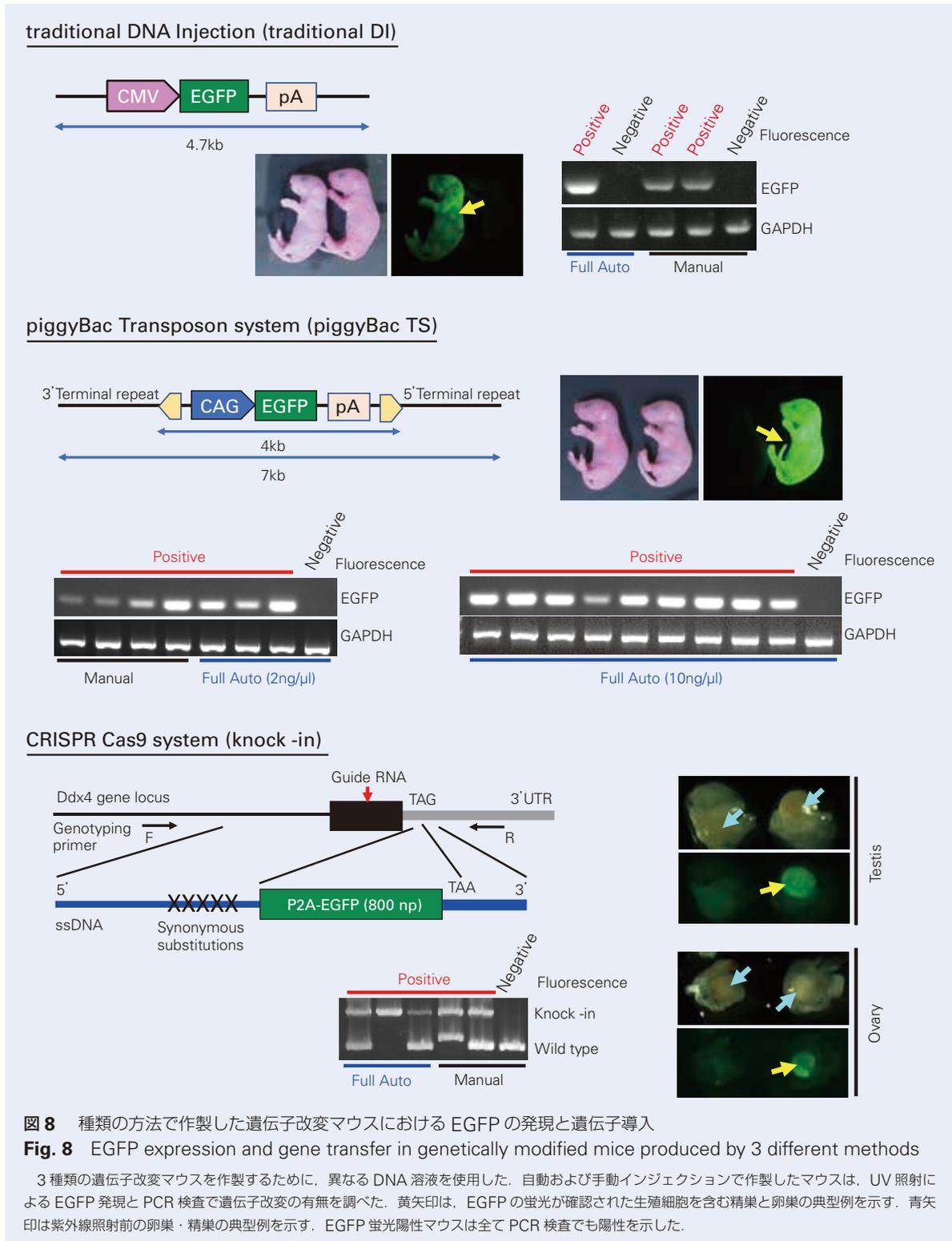
次に、適切な注入時間を決定するために、注入圧力を30 hPaに固定し、溶液を0.8, 1.2, 1.6, 2.0, 2.4 s (n = 100) に設定しインジェクションした。インジェクション後の受精卵の生存率は、注入時間が2.0 sを超えると有意に減少した(図7B)。このとき、前核の体積は注入時間とともに膨張し、両パラメータは線形関係にあった(図7C)。また、注入圧力45 hPa、注入時間0.8 sでのインジェクションは、注入圧力30 hPa、注入時間1.6 sの条件と同程度の体積膨張が得られたことから、注入量は注入圧力と注入時間の積で単純には決まらないことが示唆される。なお、以下の実験は、注入時間を変えることで、注入量を微調整可能であるため、注入圧力を30 hPaに固定した。



2.4 遺伝子改変マウスの作製

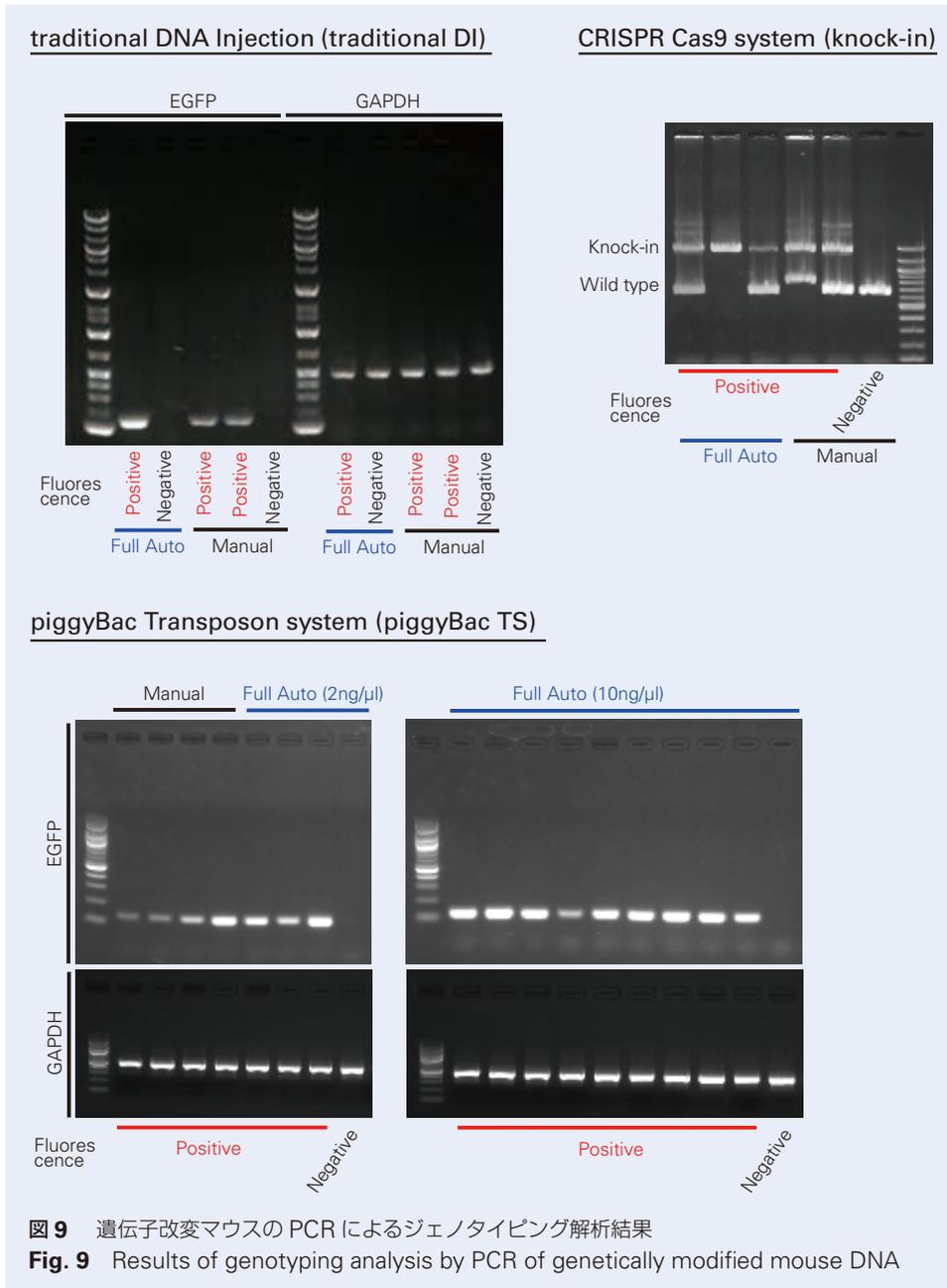
溶液を注入して遺伝子改変マウスを作製する場合、溶液に添加する核酸やタンパク質の種類や濃度は、遺伝子改変の方法によって異なる。そのため、受精卵に複数種類の溶液を自動で注入し、それぞれの場合に遺

伝子改変マウスを作製できるかを確認する必要がある。本研究は、従来の DNA Injection 法(traditional DI), piggyBac Transposon System (piggyBac TS), CRISPR-Cas9 system (knock-in) という 3 種類の方法で、遺伝子改変マウスの作製実験を行っ



た (図 8). 全ての実験において, Enhanced Green Fluorescent Protein (EGFP) 蛍光分析およびポリメラーゼ連鎖反応 (PCR) 分析の両方で陽性結果が得られた場合に, 遺伝子改変マウスが作製されたと判断した (図 8, 図 9). traditional DI や piggyBac TS

で作製したマウスは, EGFPが全身に発現していたが, knock-in で作製したマウスは, 生殖細胞が特異的に改変されるので, EGFP の発現は生殖細胞に限定された.



最初に, traditional DI 実験を 3 条件 (注入時間 0.8 s, 1.6 s の自動インジェクション, および手動インジェクション) で行った. 1.5 ng/ μ ssl の濃度の DNA を用いて, 151 個 (注入時間 0.8 s), 199 個 (注入時間 1.6 s), 148 個 (手動) の受精卵に注入した. 受精卵の生存率はそれぞれ 87.4 %, 79.4 %, 86.5 % であり, 正常な受精卵の成長性を示す 2 細胞期胚への発生率はそれぞれ 88.6 %, 89.2 %, 82.8 % であった (図 10). 生存率や発生率に関しては, 自動インジェクションと手動インジェクションの間で有意差はなかった. また, マウス胎児の得られた割合はそれぞれ 19.7 %, 19.1 %, 5.7 % であり, 自動インジェクションの方が高い傾向にあった (表 2). しかし, 自動インジェクションで得られた遺伝子改変マウスは 0 匹 (注入時間 0.8 s) と 1 匹 (注入時間 1.6 s) であり, 手動インジェクションは, 2 匹の遺伝子改変マウスが得られた. したがって, これらの条件下では, 手動インジェクションの方が効率的に遺伝子改変マウスを作製できるといえる. 自動インジェクションでは生存率が高く, 遺伝子改変率が低いことから, 最大限の効率を得るためには, 自動インジェクションにおける DNA の注入量を増やす必要があることが示唆される.

次に, piggyBac TS 実験では, 自動インジェクション (注入時間 1.6 s) および手動インジェクションで行った. 自動インジェクションでは, 2 種類の濃度 (2 ng/ μ l, 10 ng/ μ l) の DNA を注入し, 手動インジェ

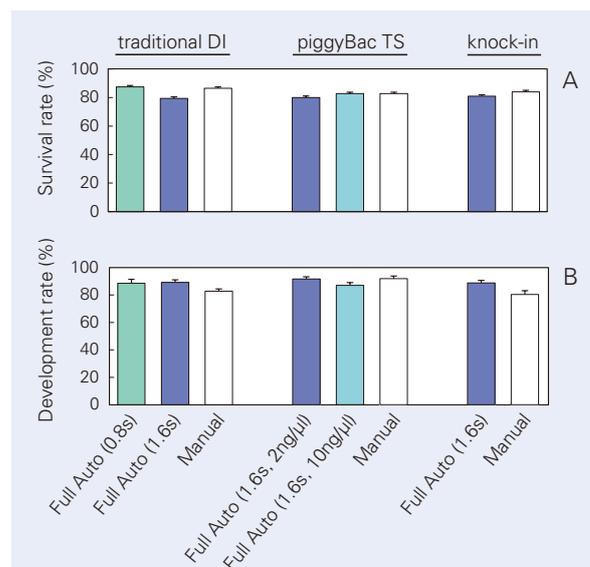


図 10 前核にインジェクションした受精卵の生存率と発生率

Fig. 10 Survival and in vitro development of zygotes injected into the pronucleus with solutions used for 3 different genetic modifications

自動インジェクションでは, 注入圧力をすべて 30 hPa に固定し, 注入時間を traditional DI は 0.8 s または 1.6 s, piggyBac TS および knock-in は 1.6 s とした. piggyBac TS では, DNA 濃度 2 ng/ μ l または 10 ng/ μ l の溶液を使用した. インジェクション後の生存率 (A) および 2 細胞期胚への発生率 (B) は, 自動インジェクションと手動インジェクションの間で有意差はなかった.

表 2 前核にインジェクションした受精卵の生存率及び発生率

Table 2 Offspring and genetic modification of zygotes injected into the pronucleus with solutions used for 3 different genetic modifications

Genetic modification method	Injection method	Injection time (s)	DNA concentration (ng/ μ l)	Number of embryos transferred	Offspring (%)	Genetically modified (%)
traditional DI	Full auto	0.8	1.5	117	23 (19.7)	0 (0.0)
		1.6	1.5	141	27 (19.1)	1 (0.7)
	Manual	-	1.5	106	6 (5.7)	2 (1.9)
piggyBac TS	Full auto	1.6	2	110	20 (18.2)	3 (2.7)
		1.6	10	108	24 (22.2)	9 (8.3)
	Manual	-	2	114	26 (22.8)	4 (3.5)
Knock-in	Full auto	1.6	2	143	37 (25.9)	3 (2.1)
	Manual	-	2	135	15 (11.1)	2 (1.5)

クションでは、2 ng/ μ l の DNA を注入した。受精卵の生存率はそれぞれ 80.0 %、82.7 %、82.7 %、発生率は 91.7 %、87.1 %、91.9 % であり、3 つの条件間で有意差はなかった (図 10)。さらに、2 ng/ μ l の DNA を用いた場合、自動インジェクションと手動インジェクションの遺伝子改変率の結果は類似していた (それぞれ 2.7 % および 3.5 %) (表 2)。また、DNA の濃度を上げると遺伝子改変率が向上したため (10 ng/ μ l ; 8.3 %)、piggyBac¹⁶⁾ による遺伝子改変の特徴が、自動インジェクションでも再現可能なことが実証された。traditional DI および piggyBac TS の実験結果は、自動インジェクションでも遺伝子改変マウスを作製できることを示唆する。

knock-in 実験では、自動インジェクション (注入時間 1.6 s) および手動インジェクションで、2 ng/ μ l の DNA を注入した。受精卵の生存率はそれぞれ 80.9 %、84.0 %、発生率は 88.8 %、80.4 % であり、両者に有意差はなかった (図 10)。また、マウス胎児の得られた割合は自動インジェクションの方が高く (それぞれ 25.9 %、11.1 %)、遺伝子改変率は同程度 (それぞれ 2.1 %、1.5 %) であった (表 2)。これらの結果は、自動インジェクションはゲノム編集による遺伝子改変マウスを作製できることを示唆する。

3. 考察

本研究は、前核への自動インジェクションと、それを用いた遺伝子改変マウスの作製を初めて報告した。現在、受精卵の遺伝子改変手法は複数ある。遺伝子改変手法の 1 つにエレクトロポレーション法があるが¹⁷⁾、traditional DI⁵⁾、piggyBac TS¹⁸⁾、人工染色体 (YACs, BACs, PACs)¹⁹⁾ を使用した遺伝子改変マウスの作製は困難である。さらに、ゲノム編集において、遺伝子ノックインは、遺伝子ノックアウトに比べ、遺伝子改変率が悪い傾向にある²⁰⁾。細胞質に DNA 溶液をインジェクションする方法も開発されているが、前核に溶液をインジェクションする方法に比べ、導入できる遺伝子の種類には制限がある¹⁸⁾、²⁰⁾。以上より、前核にインジェクションする方法は、様々な遺伝子改変に適していると考えられるが、従来方法では、高度な手技が必要であった。そこで、遺伝子改変マウスを作製するための、自動胚操作システムを開発した。

自動インジェクションを行うためのフローチャートを検討する前に、溶液の注入部位を検討した。受精卵へのインジェクション部位は通常、細胞質^{21) ~ 23)} および前核であるが、traditional DI⁵⁾、piggyBac TS¹⁸⁾ および knock-in⁹⁾、¹⁰⁾ による遺伝子改変の最初の報告では、

前核にインジェクションしていた。また、traditional DI は、細胞質へインジェクションを行うと、遺伝子改変率を著しく低下させる²⁰⁾。さらに、DNA 溶液の濃度は、前核にインジェクションする場合よりも 20 倍以上高くする必要がある²⁴⁾ ため、本研究は前核へのインジェクションを行った。

前核にインジェクションピペットを自動で挿入するためには、細胞質内の前核の位置を正確に認識する必要がある。そこで、顕微鏡に取り付けたカメラから取得した画像から、前核の 2 次元座標を認識するソフトウェアを開発した。画像処理²⁵⁾ で正確に対象を検出するには、対象の輪郭が鮮明であることが重要であり、本研究では、多くの受精卵で輪郭が明瞭に確認できた核小体 (前核内に存在する分子密度の高い領域) を座標認識の対象とした。しかし、2 次元座標認識によるインジェクションピペットの挿入成功率は 70 % にとどまった。

顕微鏡で立体構造を観察する場合、対象に焦点が合っているように見える範囲 (被写界深度) がある (図 6)。そのため、取得した画像に核小体とインジェクションピペットが表示されていても、焦点の位置と実際の核小体の高さ方向の位置が一致していない場合がある。この状態により、実際の前核の高さとインジェクションピペットの高さが合わず、挿入に失敗したと考えた。そこで、取得した画像内の核小体の輝度値から、前核の高さ位置を推定し、3 次元座標を認識するソフトウェアを開発した (図 6)。結果、3 次元座標認識による、インジェクションピペットの挿入成功率は 94 % と、従来よりも大幅に向上したため、遺伝子改変マウスの作製実験では 3 次元座標を認識するソフトウェアを使用した。

手動インジェクションの場合、前核は注入圧力 30 ~ 40 hPa、注入時間 1.0 s 以内で膨張する傾向にある²⁰⁾。そこで、注入時間を 0.8 s に固定し、注入圧力を 30 ~ 45 hPa まで段階的に増加させ、最適な注入圧力を検討した。結果、受精卵の生存率は注入圧力が 30 hPa と 35 hPa では同程度であり、45 hPa で有意に減少した。注入圧力を 35 hPa 以上になると受精卵の生存率が低下する傾向にあったため、注入時間の検討は、注入圧力を 30 hPa に固定して行った。結果、注入圧力 30 hPa、注入時間 2.0 s でインジェクションすると、前核は元の体積の 136 % に膨張するが、受精卵の生存率にほとんど影響を与えないことがわかった (図 7)。注入圧力 30 hPa、注入時間 1.6 s と注入圧力 45 hPa、注入時間 0.8 s による前核の膨張率は同等であるが、後者では受精卵の生存率が低くなった。これは、注入圧力が高い場合、注入圧力が低

い場合と同等の注入量であっても、受精卵が損傷する可能性が高いためと考える²⁰⁾。このことは、できるだけ低い注入圧力で、時間をかけてインジェクションを行うことで、受精卵の生存率が向上することを示唆する。そこで、遺伝子改変マウスの作製実験では、注入圧力を 30 hPa に固定し、注入時間を 0.8 s から段階的に延ばして行った。

注入圧力 30 hPa、注入時間 1.6 s でインジェクションした受精卵の生存率および発生率は、traditional DI, piggyBac TS, knock-in の実験において、自動インジェクションと手動インジェクションに大きな違いはなかった (図 10)。各実験で使用した溶液は、それぞれ内容物が異なっていたため、注入方法や注入した溶液よりも、注入条件が受精卵の生存率と発生率を決定する主要な要因であると考えられる。traditional DI では、1.5 ng/μl の DNA 溶液を用いた自動インジェクション、手動インジェクションともに、少数の遺伝子改変マウスしか得られなかった。しかし、traditional DI では、DNA 溶液の濃度の増減により遺伝子組換え率が変動している報告がある²⁰⁾。今後は、遺伝子改変マウス作製に及ぼす DNA 濃度の影響を、IAEMS を用いて評価したい。

受精卵に溶液を自動インジェクションする方法は、これまでもいくつか報告されている。例えば、ゼブラフィッシュ²¹⁾ やショウジョウバエ²²⁾ では、細胞質への自動インジェクションが報告されているが、遺伝子改変は実現していない。また、哺乳類では、マウスで細胞質への自動インジェクションが報告されているが²³⁾、遺伝子改変への影響は検討されていない。本研究では、IAEMS を用いた実験により、複数種類の遺伝子改変方法においても自動インジェクションによって遺伝子改変マウスが作製できることを明らかにした (表 2)。

4. 実験方法

4.1 動物

受精卵採取は Jcl : BDF1 マウスを使用した (雌 : 8 ~ 16 週齢, 雄 : 12 ~ 20 週齢)。胚移植のレシピエントは Jcl : MCH マウスを使用した (雌 : 10 ~ 16 週齢)。全てのマウスは日本クレア株式会社から購入した。マウスは室温 22 ± 0.5 °C、湿度 55 ± 5 %、照明点灯時間 8 : 00 ~ 20 : 00 の条件下で飼育し、エサおよび水は自由摂取で与えた。

すべての動物実験は、(公財) 実験動物中央研究所動物委員会によって承認され、Animal Research : Reporting of In Vivo Experiments (ARRIVE) の

ガイドラインおよび(公財)実験動物中央研究所のガイドラインに従って実施された。

4.2 受精卵の採取, 凍結保存, 移植

受精卵は体外受精にて採取した。体外受精の 8 時間後に、ガラス化保存法を用いて凍結保存した²⁶⁾。凍結保存状態の受精卵は、加温 1 時間後にインジェクションに使用した。インジェクションした受精卵を KSOM 培地²⁷⁾ で in vitro で培養し、翌日の朝 (10 : 00 ~ 12 : 00) にレシピエントに移植した。これらの操作に使用された溶液は、アーク・リソース株式会社から購入した。

4.3 受精卵へのインジェクション

ハードウェアは EMS (XY-MC0202-701-001 ; 日本精工株式会社) と電動インジェクタ (Femtojet 4i ; Eppendorf AG) を顕微鏡 (ECLIPSE Ti2-U ; ニコン株式会社) に搭載して作製した。(図 2, 写真 1)。EMS は、シリアル通信により電動インジェクタなどの周辺機器を制御するためのソフトウェアがインストールされており、受精卵の位置を自動的に検出する画像処理機能 (図 3)、各ピペットを注入対象の受精卵付近へ自動的に移動させる、注入後の受精卵を非操作領域へ移動させる機能 (図 4) などが搭載されている。遺伝子改変マウス作製実験では、前核へのインジェクションピペットの挿入を自動化するために、LabVIEW 2017 for Windows (National Instruments, Austin) で新規にソフトウェアを開発し、既存の EMS と統合した IAEMS を使用した (図 1, 図 5, 図 6)。IAEMS 用に実験的に導出した注入条件 (注入圧力, 注入時間) で、自動インジェクションを行った。対照実験におけるインジェクションは、同様のハードウェアを用いて、すべて手動で行った¹¹⁾。

全てのインジェクションは、ホールディングピペット (外径φ 100 μm, 内径φ 40 μm, 曲げ角度 30 °, HD052010040 ; サンキョーメディック株式会社) とインジェクションピペット (先端角度 45 °, 内径φ 1 μm, 曲げ角度 20 °, DNA-102001 ; サンキョーメディック株式会社) を使用して行った。インジェクションのための培地ドロップは、プラスチックディッシュ (351,006 ; Corning Incorporated) の上に 20 μl の M2 培地 (M7167 ; Millipore Sigma) を滴下し、ミネラルオイル (M8410 ; Millipore Sigma) で覆って準備した。各インジェクション実験につき、15 ~ 30 個の受精卵を用いて繰り返し行った。インジェクションピペットの挿入の成否は、インジェクション時の前核の膨張を観察することにより確認した。

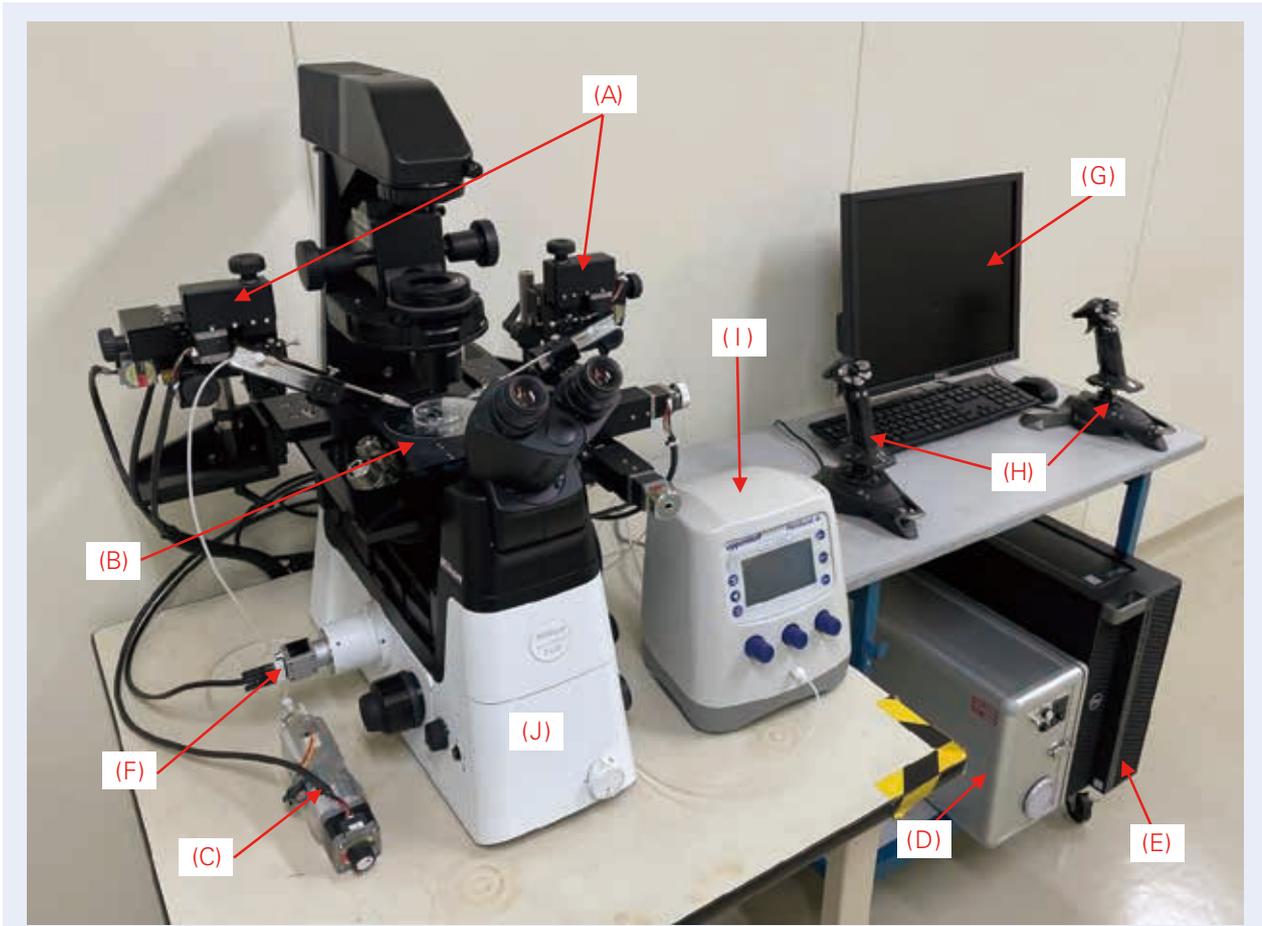


写真1 自動胚操作システム(Integrated Automated Embryo Manipulation System : IAEMS)
Photo 1 Integrated Automated Embryo Manipulation System (IAEMS)

IAEMSは、EMS [(A)電動マニピュレータ、(B)電動試料ステージ、(C)電動ポンプ、(D)電装盤、(E)コントローラ、(F)顕微鏡カメラ、(G)ディスプレイ、(H)ジョイスティック]、(I)電動インジェクタ、および(J)顕微鏡から構成される。コントローラはWindows用のLabVIEWソフトウェアがインストールされており、各機器の制御に使用される。

4.4 遺伝子改変マウス作製の溶液調製

traditional DI, piggyBac TS および knock-in で使用した溶液の組成を図8に示す。traditional DIでは、緑色蛍光タンパク質を発現させる pEGFP-N1 (Clontech ; Mountain View) を AseI 制限酵素 (NEB ; Ipswich) で処理を行い4.7 kb の DNA 断片を生成し、ヌクレアーゼフリーの水 (Promega ; Madison) で 1.5 ng/ μ l に希釈して使用した。piggyBac TS では、piggyBac ベクター (1.33 ng/ μ l または 6.66 ng/ μ l) およびトランスポゾンベクター (0.66 ng/ μ l または 3.33 ng/ μ l) をそれぞれ 2 ng/ μ l および 10 ng/ μ l の総濃度で生理食塩水に溶解して使用した。knock-in では、生殖細胞を特異的に遺伝子改変させたノックインマウスを作製するために、ターゲティングベクター (Vasa-P2A-EGFP) を作成して使用した。

4.5 遺伝子改変マウスの解析

traditional DI と piggyBac TS は同様の方法で解析した。遺伝子改変マウスにおける EGFP 蛍光の発現は、UV 顕微鏡 (VB-6000 ; 株式会社キーエンス) により可視化した。knock-in は、生殖細胞のみ EGFP 蛍光が発現しているため、卵巣または精巣に紫外線を照射して可視化した (SZX16 ; オリンパス株式会社)。子孫マウスの遺伝子型判定は、いずれの実験も尾端の粗溶液を用いて PCR 検査を行った。

4.6 統計解析

受精卵の生存率と2細胞期胚への発生率の実験結果は、平均 \pm 標準誤差で表し、正規分布を確認した後に t 検定を用いて統計解析を行った。すべての分析において、 $P < 0.01$ は、統計的有意性を示すとみなした。実験データの解析は、自動解析ソフト Statcel4 (有限会社オーエムエス出版) を用いた。

5. あとがき

本稿は、十分な訓練や経験がなくても、受精卵の核心に溶液を簡単かつ再現性よくマイクロインジェクションできる IAEMS の開発および実証結果を紹介した。IAEMS を用いることで、生物学、医学、薬学などの研究において、遺伝子改変マウスの作製が容易になると考えられる。今後、マイクロマニピュレーションを自動化するための本技術を通じ、ヒトや動物の自然科学の発展に貢献していきたい。

本稿は、Springer Nature が刊行する電子ジャーナル誌「Scientific Reports」に掲載された投稿論文を和文翻訳、加筆修正したものです²⁸⁾。

参考文献

- 1) K. Kersten, K. E. de Visser, M. H. van Miltenburg, J. Jonkers, "Genetically engineered mouse models in oncology research and cancer medicine", *EMBO Mol. Med.*, 9 (2017) 137-153.
- 2) R. A. Davey, H. E. MacLean, "Current and future approaches using genetically modified mice in endocrine research", *Am. J. Physiol. Endocrinol. Metab.* 291 (2006) E429-438.
- 3) S. B. Liggett, "Genetically modified mouse models for pharmacogenomic research", *Nat. Rev. Genet.*, 5 (2004) 657-663.
- 4) C. Babinet, "Transgenic mice: an irreplaceable tool for the study of mammalian development and biology", *J. Am. Soc. Nephrol.*, 11 (2000) S88-S94.
- 5) J. W. Gordon, G. A. Scangos, D. J. Plotkin, J. A. Barbosa, F. H. Ruddle, "Genetic transformation of mouse embryos by microinjection of purified DNA", *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, 77 (1980) 7380-7384.
- 6) Z. Ivics et al., "Transposon-mediated genome manipulation in vertebrates", *Nat. Methods*, 6 (2009) 415-422.
- 7) D. A. Largaespada, "Transposon mutagenesis in mice", *Methods Mol. Biol.*, 530 (2009) 379-390.
- 8) M. Meyer, M. H. de Angelis, W. Wurst, R. Kühn, "Gene targeting by homologous recombination in mouse zygotes mediated by zinc-finger nucleases", *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, 107 (2010) 15022-15026.
- 9) B. Wefers, B et al., "Direct production of mouse disease models by embryo microinjection of TALENs and oligodeoxynucleotides", *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, 110 (2013) 3782-3787.
- 10) B. Shen et al., "Efficient knockin mouse generation by ssDNA oligonucleotides and zinc-finger nuclease assisted homologous recombination in zygotes", *PLoS One*, 8 (2013) e77696.
- 11) R. Behringer, M. Gertsenstein, A. Nagy, K. Nagy, "Manipulating the Mouse Embryo: A Laboratory Manual", Fourth edition (2014) 237-319, CSH Press.
- 12) W. Xu, "Microinjection and Micromanipulation: A Historical Perspective", *Methods Mol. Biol.*, 1874 (2019) 1-16.
- 13) D. Murphy, "Microinjection of cloned DNA fragments into fertilized one-cell mouse eggs: II. Automatic injection", *Methods Mol. Biol.*, 18 (1993) 163-167.
- 14) A. Nagy, M. Gertsenstein, K. Vintersten, R. Behringer, "Manipulating the Mouse Embryo: A Laboratory Manual", Third edition (2003) 289-358, CSH Press.
- 15) X. A. Pu, A. P. Young, H. M. Kubisch, "Production of Transgenic Mice by Pronuclear Microinjection", *Methods Mol. Biol.*, 1874 (2019) 17-41.
- 16) J. Marh et al., "Hyperactive self-inactivating piggyBac for transposase-enhanced pronuclear microinjection transgenesis", *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, 109 (2012) 19184-19189.
- 17) T. Kaneko, T. Mashimo, "Simple Genome Editing of Rodent Intact Embryos by Electroporation", *PLoS One*, 10 (2015) e0142755.
- 18) S. Ding et al., "Efficient transposition of the piggyBac (PB) transposon in mammalian cells and mice", *Cell*, 122 (2005) 473-483.
- 19) P. Giraldo, L. Montoliu, "Size matters: use of YACs, BACs and PACs in transgenic animals", *Transgenic Res.*, 10 (2001) 83-103.
- 20) R. L. Brinster, H. Y. Chen, M. E. Trumbauer, M. K. Yagle, R. D. Palmiter, "Factors affecting the efficiency of introducing foreign DNA into mice by microinjecting eggs", *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, 82 (1985) 4438-4442.
- 21) W. Wang, X. Liu, D. Gelinas, B. Ciruna, Y. Sun, "A fully automated robotic system for microinjection of zebrafish embryos", *PLoS One*, 2 (2007) e862.
- 22) E. Cornell et al., "Automating fruit fly *Drosophila* embryo injection for high throughput transgenic studies", *Rev. Sci. Instrum.*, 79 (2008) 013705.
- 23) X. Liu et al., "Automated microinjection of recombinant BCL-X into mouse zygotes enhances embryo development", *PLoS One*, 6 (2011) e21687.
- 24) H. Yang et al., "One-step generation of mice carrying reporter and conditional alleles by CRISPR/Cas-mediated genome engineering", *Cell*, 154 (2013) 1370-1379.
- 25) D. H. Ballard, "Generalizing the Hough transform to detect arbitrary shapes", *Pattern Recognition*, 13 (1981) 111-122.
- 26) T. Eto, R. Takahashi, T. Kamisako, "Strain preservation of experimental animals: vitrification of two-cell stage embryos for multiple mouse strains", *Cryobiology*, 70 (2015) 150-155.
- 27) Y. Ho, K. Wigglesworth, J. J. Eppig, R. M. Schultz, "Preimplantation development of mouse embryos in KSOM: augmentation by amino acids and analysis of gene expression", *Mol. Reprod. Dev.*, 41 (1995) 232-238.
- 28) T. Eto, H. Ueda, N. Tanaka et al., "Establishment of an integrated automated embryonic manipulation system for producing genetically modified mice", *Sci. Rep.*, 11 (2021) 11770.

商品

紹介

NSK Verify (2次元コードを用いた軸受情報取得サービス)

NSK Verify (Bearing Information App with 2D Barcode Scanner)

近年、モノづくりの分野において Industry4.0 に代表されるような IT 技術を活用する取組みが急速に進んでいる。特に生産現場では情報の通信および共有を基盤とするスマートファクトリーの実現に向け、製造プロセスや生産財などの情報をデジタル化し、それら情報への敏速なアクセスを可能にすることが求められている。

そこで NSK では軸受を使用する製品の生産・設計における情報活用の効率化を支援するため、軸受情報を簡便に取得可能なサービスを提供しているのでその内容について紹介する。

1. 構成、構造、および仕様

無料の NSK 専用アプリを携帯端末にインストールし、アプリを使用して意匠箱の 2 次元コードをスキャンするだけでサービスの利用が可能である。(写真 1)

端末対応：iOS、android

言語：英語・日本語・中国語に対応

※本サービスは 2 次元コード右下に“N”を付与している製品が対象。

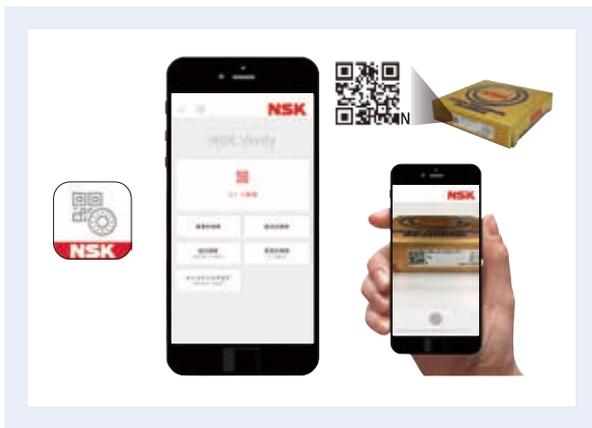


写真 1 NSK Verify APP

Photo 1 NSK Verify App

2. 特長

(1) 軸受検査成績の電子データによる提供

個体識別番号・軸受名番・グリース銘柄・各種寸法精度・回転精度などの軸受個体毎の軸受検査成績の情報(写真 2)を電子データで取得可能となっている。データは CSV および PDF で取り出しが可能であるため他の情報機器への転送や、電子データとして情報を管理することが可能であり、軸受選別の自動化や使用履歴管理・トレーサビリティの向上などに利用することができる。(図 1)

※軸受検査成績電子データ提供対象製品

精密軸受(軸受精度 ISO Class 5 以上)のアンギュラ玉軸受、円筒ころ軸受およびスラストアンギュラ玉軸受

(2) 真贋判定のサポート

2 次元コード内の情報と NSK のデータベースを照合することで正規品/不正品の可能性情報(写真 3)を提供している。また、読取り回数から模造品の可能性の推測も可能である。

(3) 事業所・販売店の検索

2 次元コードから取得した個体識別番号により迅速な注文・問い合わせが可能である。

(4) その他サービス

アプリ内から NSK Web サイトの製品情報・各種カタログ・軸受の取り扱い方をはじめとするメンテナンス情報・各種技術計算などの便利なコンテンツにアクセス可能である。

3. 用途

本サービスは、寸法精度をもとに軸受を選別して使用するような工作機械用スピンドルに用いられる精密軸受の情報管理に特に適している。

4. まとめ

2 次元コードおよび携帯端末アプリを用いた軸受情報取得サービスについて紹介した。本サービスを利用することにより意匠箱を開封することなく軸受の情報を簡便に取得することが可能である。

今後対象製品・サイズおよび用途の拡大を進め、モノづくり分野における情報活用の効率化に貢献していく。

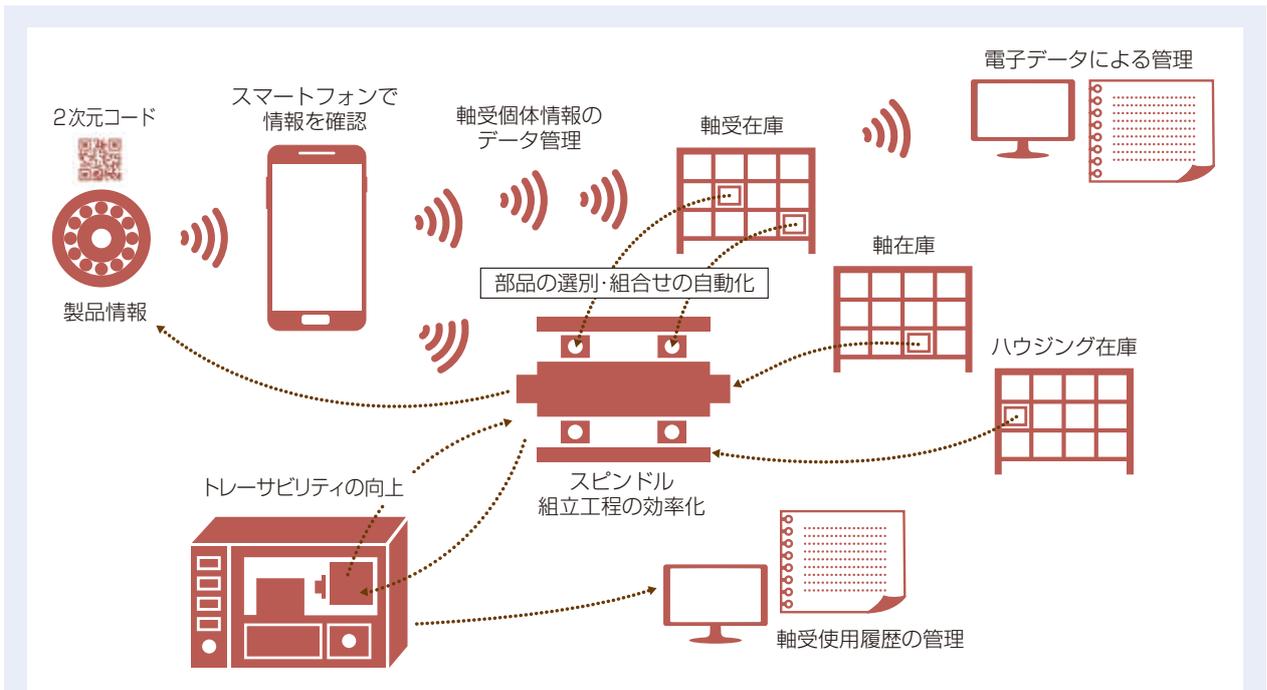


図 1 軸受個体情報の活用
 Fig. 1 Utilization of individual bearing information



写真 2 軸受検査成績の電子データ
 Photo 2 Digital inspection records



写真 3 真贋判定サポート
 Photo 3 Support in assessing product authenticity

商品

紹介

バイオマスプラスチック保持器搭載 深溝玉軸受 Bioplastic Cage for Deep Groove Ball Bearings

世界規模でカーボンニュートラルを目指す動きが加速する中、NSKでは、サプライチェーン排出量の削減として、自社生産におけるCO₂排出の削減（Scope1、2）や、軸受回転抵抗によるエネルギー損失の低減（Scope3 下流）にとどまらず、製品そのものもカーボンニュートラル（Scope3 上流）に対応すべく、バイオマスプラスチックを保持器部材として採用した軸受を開発した。（写真1）

Scope1：自社での燃料消費等による排出

Scope2：自社での電気使用等による排出

Scope3 上流：原材料、輸送等による排出

Scope3 下流：製品の使用、排出

1. 構成、構造、および仕様

100%植物由来の耐熱バイオマスプラスチックを保持器に採用することで、従来の石油由来のプラスチックと比較し、CO₂排出量を削減することが可能となる。

2. 特長

(1) CO₂排出量の削減

従来の石油由来のプラスチック保持器に対し、保持器単体で、CO₂排出量を約90%削減できる。

(2) リアルデジタルツインの活用

リアルデジタルツイン^{*1}の活用により、寸法、形状・変形、欠陥・成形不良、強度を予測することで、開発期間の短縮を可能にした（図1）。

※1 現象の内部を詳細に観察し、そのカラクリの推理、モデル化を通じ本質を理解することで、既存概念を打ち破るソリューションを発想するNSK独自の開発手法。

(3) 軸受性能

従来の石油由来のプラスチック保持器に対し、同等の軸受性能を有したまま、CO₂排出量の大幅削減という新たな価値を提供できる（図2）。



写真1 バイオマスプラスチック保持器搭載 深溝玉軸受

Photo 1 Deep groove ball bearing with bioplastic cage

3. 用途

本製品は、エアコンファンモータ用をはじめとする小型モータに適する。

4. まとめ

NSKは、カーボンニュートラルな社会の実現に取り組んでいる。この一環として、従来の石油由来のプラスチックに比べCO₂削減効果の高いバイオマスプラスチックの採用を拡大していく。

NSKは、本製品の売上として、2024年に8億円を目指す。

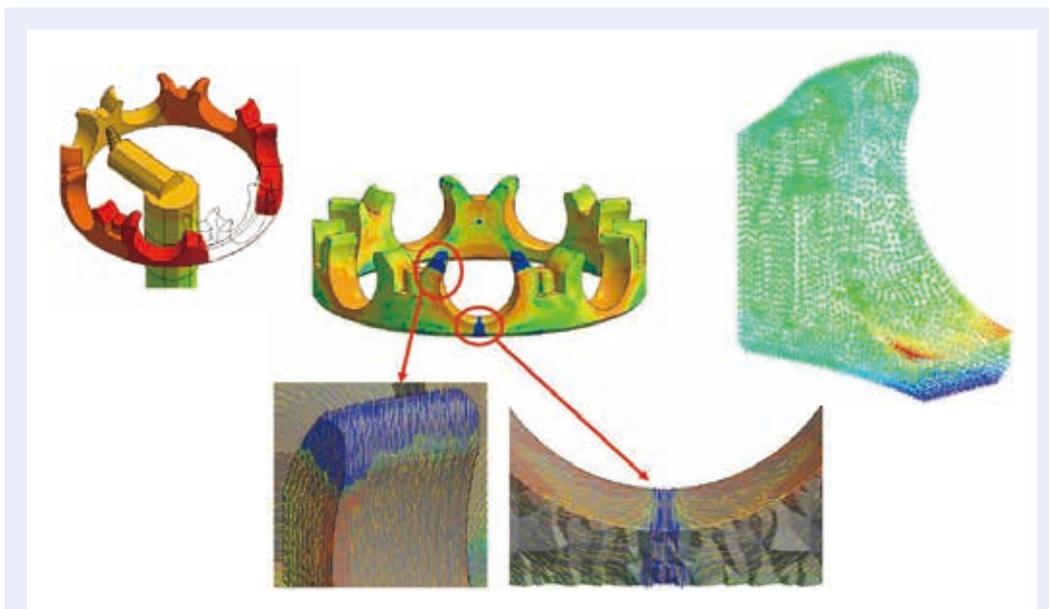


図1 リアルデジタルツインの活用
 Fig. 1 Utilization of real digital twins

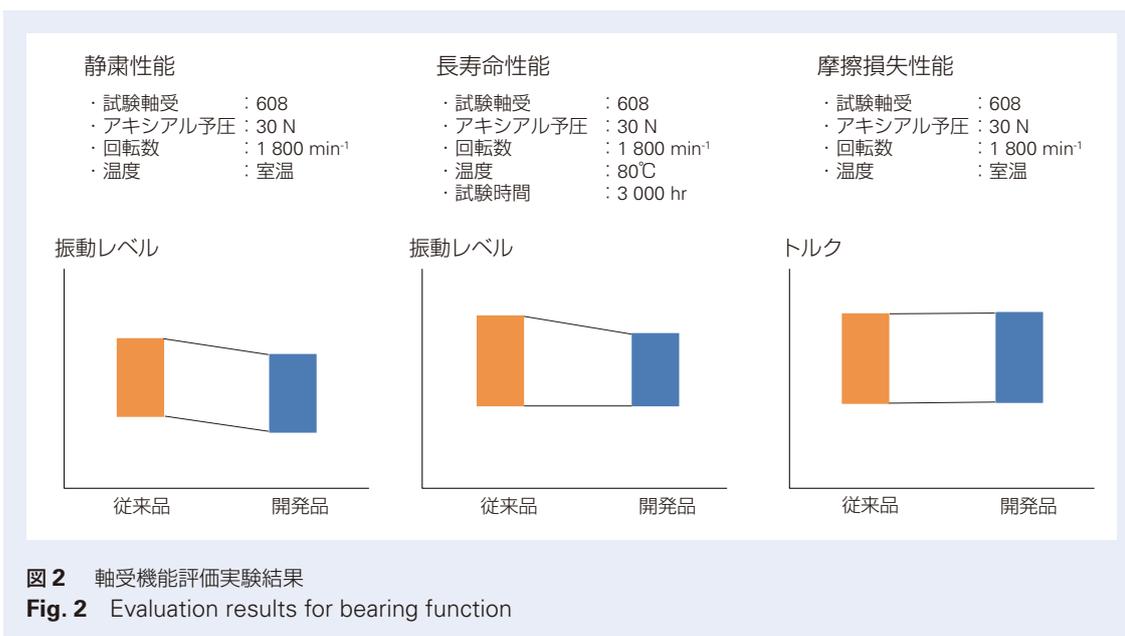


図2 軸受機能評価実験結果
 Fig. 2 Evaluation results for bearing function

商品

紹介

高負荷容量プレス保持器アンギュラ玉軸受 (BEAW)

High Load Capacity Angular Contact Ball Bearings with Pressed Steel Cage (BEAW)

多くの産業機械では、高い信頼性、メンテナンスの容易さ、ランニングコストの削減、省エネルギーや環境に優しいことが要求されている。

このため産業機械に使用される軸受は、更なる性能向上が求められている。NSKは、このニーズに応えるため、産業機械の汎用ポンプ、射出成形機などで幅広く採用されているプレス保持器アンギュラ玉軸受について、当社従来仕様 (BW タイプ) に対して、更に高負荷容量を実現したアンギュラ玉軸受 (BEAW タイプ) (写真 1) を開発し商品化したので、以下に概要を紹介する。

1. 構成, 構造, および仕様

当社従来品よりも玉径を大きくし (図 1)、長寿命化した高負荷容量プレス保持器アンギュラ玉軸受を開発した。また、本製品は潤滑油の流動性を向上させることで、搭載製品の効率や信頼性の向上に貢献する。

2. 特長

高負荷容量プレス保持器アンギュラ玉軸受の特長を以下に示す。

(1) 軸受寿命：当社従来品比 1.2 ~ 1.6 倍

玉径を大きくすることにより、当社従来品比 1.2 ~ 1.6 倍の長寿命化を達成した。ラインアップしたサイズ毎の L10 寿命 (疲れ寿命) の従来品比を図 2 に示す。また、開発品と従来品の寿命計算結果を図 3 に示す。

(2) 油の流動性向上

当社従来品と比較して、内輪と保持器のすきまを増やし (写真 2)、潤滑油の貫通性が当社従来品比 1.4 倍に向上した (図 4)。

本特長により、潤滑油の流動性や冷却効果の向上が期待され、搭載製品の効率や信頼性の向上に貢献する。

3. 用途

本製品は、汎用ポンプや射出成形機などの一般産業機械に幅広く適用できる。

本シリーズは、内径 35 mm ~ 80 mm をラインアップした (表 1)。



写真 1 高負荷容量プレス保持器アンギュラ玉軸受 BEAW
Photo 1 High load capacity angular contact ball bearings with pressed steel cage (BEAW)

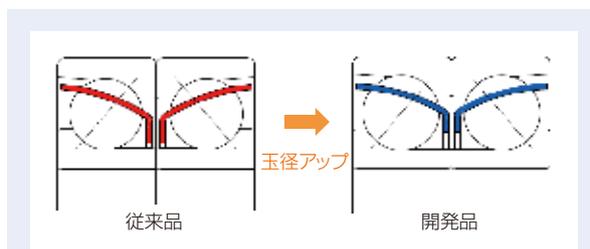


図 1 従来品と開発品の断面図

Fig. 1 Cross-sectional view of conventional product and new product

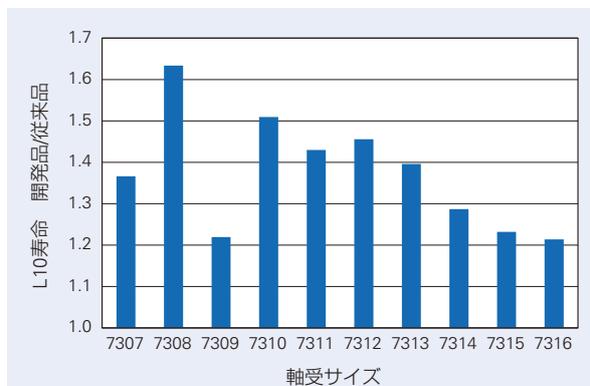


図 2 軸受サイズ毎の L10 寿命比較

Fig. 2 L10 life comparison by bearing size

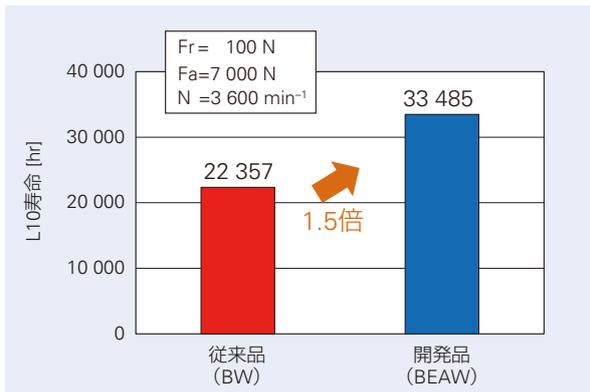


図3 L10 寿命比較例(7310)
Fig. 3 L10 life comparison (7310)



写真2 内輪と保持器のすきま比較
Photo 2 Comparison of clearance between inner ring and cage

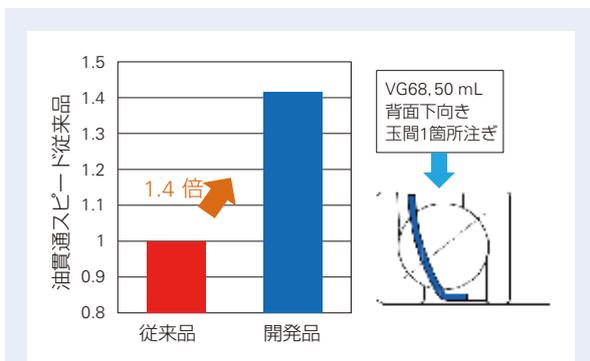


図4 油貫通スピード(7310)
Fig. 4 Oil penetration speed (7310)

4. まとめ

高負荷容量プレス保持器アンギュラ玉軸受 BEAW は、長寿命化によるメンテナンス期間の延長やランニングコストの削減などの経済性の改善が期待できる。

また、潤滑油の流動性向上から潤滑機能の信頼性も向上している。

本製品は一般産業機械用として幅広く適用することができ、市場のますます厳しくなる環境を支える製品として貢献する。

表1 開発品(BEAWタイプ)のラインアップと諸元表
Table 1 New product (BEAW) lineup and specification table

	主要寸法 [mm]					基本定格荷重 (単列) [N]		許容回転数 (単列) [min^{-1}]		基本定格荷重 (組合せ) [N]		許容回転数 (組合せ) [min^{-1}]	
	d	D	B	r (最小)	r1 (最小)	Cr	C0r	油潤滑	グリース潤滑	Cr	C0r	油潤滑	グリース潤滑
7307BEAW	35	80	21	1.5	1	40 500	24 400	7 500	5 600	65 500	49 000	6 000	4 500
7308BEAW	40	90	23	1.5	1	53 000	33 000	6 700	5 000	86 500	65 500	5 300	4 000
7309BEAW	45	100	25	1.5	1	62 500	39 500	6 000	4 500	102 000	79 500	4 800	3 600
7310BEAW	50	110	27	2	1	78 000	50 500	5 600	4 000	127 000	101 000	4 500	3 200
7311BEAW	55	120	29	2	1	89 000	58 500	5 000	3 600	145 000	117 000	4 000	3 000
7312BEAW	60	130	31	2.1	1.1	102 000	68 500	4 500	3 400	166 000	137 000	3 800	2 600
7313BEAW	65	140	33	2.1	1.1	114 000	77 000	4 300	3 200	184 000	154 000	3 400	2 400
7314BEAW	70	150	35	2.1	1.1	124 000	87 500	4 000	2 800	201 000	175 000	3 200	2 400
7315BEAW	75	160	37	2.1	1.1	134 000	98 500	3 800	2 800	217 000	197 000	3 000	2 200
7316BEAW	80	170	39	2.1	1.1	144 000	110 000	3 400	2 600	235 000	220 000	2 800	2 000

本 社	TEL.03-3779-7111 (代)	FAX.03-3779-7431	東京都品川区大崎 1-6-3 (日精ビル) 〒141-8560
産業機械事業本部	TEL.03-3779-7227 (代)	FAX.03-3779-7433	東京都品川区大崎 1-6-3 (日精ビル) 〒141-8560
自動車事業本部	TEL.03-3779-7189 (代)	FAX.03-3779-7917	東京都品川区大崎 1-6-3 (日精ビル) 〒141-8560
営業本部			
販売技術統括部	TEL.03-3779-7315 (代)	FAX.03-3779-8698	東京都品川区大崎 1-6-3 (日精ビル) 〒141-8560
東北支社	TEL.022-261-3735 (代)	FAX.022-261-3768	宮城県仙台市青葉区一番町 4-1-25 (JRE 東二番丁スクエア 3F) 〒980-0811
北関東支社	TEL.027-321-2700 (代)	FAX.027-321-3476	群馬県高崎市栄町 16-11 (高崎イースタワー 3F) 〒370-0841
長岡営業所	TEL.0258-36-6360 (代)	FAX.0258-36-6390	新潟県長岡市東坂之上町 2-1-1 (ファース長岡ビル 7F) 〒940-0066
東京支社			
営業部	TEL.03-3779-7251 (代)	FAX.03-3495-8241	東京都品川区大崎 1-6-3 (日精ビル) 〒141-8560
販売技術部	TEL.03-3779-7307 (代)	FAX.03-3495-8241	東京都品川区大崎 1-6-3 (日精ビル) 〒141-8560
札幌営業所	TEL.011-231-1400 (代)	FAX.011-251-2917	北海道札幌市中央区北五条西 6-2-2 (札幌センタービル 16F) 〒060-0005
宇都宮営業所	TEL.028-610-8701 (代)	FAX.028-610-8717	栃木県宇都宮市東宿郷 2-2-1 (ビッグ・ピースクエア 7F) 〒321-0953
日立営業所	TEL.029-222-5660 (代)	FAX.029-222-5661	茨城県水戸市城南 1-4-7 (第 5 プリンスビル 6F) 〒310-0803
西関東支社	TEL.046-223-9911 (代)	FAX.046-223-9910	神奈川県厚木市中町 2-6-10 (東武太朋ビル 5F) 〒243-0018
長野支社	TEL.0266-58-8800 (代)	FAX.0266-58-7817	長野県諏訪市中洲 5336-2 (諏訪貿易流通会館轟ビル 4F) 〒392-0015
上田営業所	TEL.0268-26-6811 (代)	FAX.0268-26-6813	長野県上田市大手 1-6-4 〒386-0024
静岡支社	TEL.054-253-7310 (代)	FAX.054-275-6030	静岡県静岡市葵区紺屋町 17-1 (葵タワー 22F) 〒420-0852
名古屋支社			
営業部	TEL.052-249-5750 (代)	FAX.052-249-5751	愛知県名古屋市中区新栄 2-1-9 (雲竜フレックスビル西館 2F) 〒460-0007
販売技術部	TEL.052-249-5720 (代)	FAX.052-249-5711	愛知県名古屋市中区新栄 2-1-9 (雲竜フレックスビル西館 2F) 〒460-0007
北陸支社	TEL.076-260-1850 (代)	FAX.076-260-1851	石川県金沢市藤江南 1-40 〒920-0346
関西支社			
営業部	TEL.06-6945-8158 (代)	FAX.06-6945-8175	大阪府大阪市中央区北浜東 1-26 (大阪日精ビル) 〒540-0031
販売技術部	TEL.06-6945-8168 (代)	FAX.06-6945-8178	大阪府大阪市中央区北浜東 1-26 (大阪日精ビル 7F) 〒540-0031
京滋営業所	TEL.077-526-8212 (代)	FAX.077-526-1790	滋賀県大津市京町 4-4-23 (アソルティ大津京町 2F) 〒520-0044
兵庫支社	TEL.079-289-1521 (代)	FAX.079-289-1675	兵庫県姫路市南駅前町 100 (パライオ第 2 ビル 8F) 〒670-0962
中国支社	TEL.082-285-7760 (代)	FAX.082-283-9491	広島県広島市南区大州 3-7-19 (広島日精ビル) 〒732-0802
福山営業所	TEL.084-954-6501 (代)	FAX.084-954-6502	広島県福山市曙町 5-29-10 〒721-0952
九州支社	TEL.092-451-5671 (代)	FAX.092-474-5060	福岡県福岡市博多区博多駅東 2-6-1 (九筋筑紫通ビル 7F) 〒812-0013
熊本営業所	TEL.096-381-8500 (代)	FAX.096-381-0501	熊本県熊本市中央区水前寺 3-3-25 (増永水前寺ビル 2F) 〒862-0950
自動車営業本部			
東日本自動車第一部(厚木)	TEL.046-223-8881 (代)	FAX.046-223-8880	神奈川県厚木市中町 2-6-10 (東武太朋ビル 5F) 〒243-0018
東日本自動車第一部(東海)	TEL.0566-71-5351 (代)	FAX.0566-71-5365	愛知県安城市三河安城町 1-9-2 (第 2 東祥ビル 5F) 〒446-0056
東日本自動車第二部(大崎)	TEL.03-3779-7892 (代)	FAX.03-3779-7439	東京都品川区大崎 1-6-3 (日精ビル) 〒141-8560
東日本自動車第二部(宇都宮)	TEL.028-610-9805 (代)	FAX.028-610-9806	栃木県宇都宮市東宿郷 2-2-1 (ビッグ・ピースクエア 7F) 〒321-0953
東日本自動車第三部(東海)	TEL.0566-71-5260 (代)	FAX.0566-71-5365	愛知県安城市三河安城町 1-9-2 (第 2 東祥ビル 5F) 〒446-0056
東日本自動車第三部(日立)	TEL.029-222-5660 (代)	FAX.029-222-5661	茨城県水戸市城南 1-4-7 (第 5 プリンスビル 6F) 〒310-0803
中部日本自動車部(豊田)	TEL.0565-31-1920 (代)	FAX.0565-31-3929	愛知県豊田市下市場町 5-10 〒471-0875
中部日本自動車部(大阪)	TEL.06-6945-8169 (代)	FAX.06-6945-8179	大阪府大阪市中央区北浜東 1-26 (大阪日精ビル 3F) 〒540-0031
中部日本浜松自動車部	TEL.053-456-1161 (代)	FAX.053-453-6150	静岡県浜松市中区板屋町 111-2 (浜松アクタワー 19F) 〒430-7719
西日本自動車部(広島)	TEL.082-284-6501 (代)	FAX.082-284-6533	広島県広島市南区大州 3-7-19 (広島日精ビル) 〒732-0802

〈2022年3月現在〉
最新情報はNSKホームページをご覧ください。

お問合せ：製品については、お近くの支社・営業所にお申し付けください。

製品の技術的な内容
についてのお問合せ

■ベアリング・精機製品関連 (ボールねじ・リニアガイド・モノキャリア) ☎ 0120-502-260
■メガトルクモータ・XYモジュール ☎ 0120-446-040

他国へ輸出する場合は、製品の輸出に必要な最新法規制の調査を行い、許可取得等の手続きをお願いします。

このカタログの内容については、技術的進歩および改良に対応するため製品の外觀、仕様を予告なしに変更することがあります。なお、カタログの制作には正確を期するために細心の注意を払いましたが、誤記脱漏による損害については責任を負いかねます。

このカタログの内容、テキスト、画像の無断転載・複製を禁止します。

NSK TECHNICAL JOURNAL

JANUARY 2023 No. 695

印刷 令和5年1月15日
発行 令和5年1月22日
編集人 三田村 宣晶
発行人 森川 俊哉
印刷所 久下印刷株式会社
発行所 **日本精工株式会社**
コーポレート・コミュニケーション部
TEL 03-3779-7050
東京都品川区大崎 1-6-3 日精ビル

非売品



日本精工株式会社



円滑でくらしやすい地球のために

この印刷物は環境に配慮した印刷方法を採用しています。